Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 18 (1927)

Heft: 11

Artikel: Erster Bericht des Ausschusses für die Arbeiten mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen. B. Über das Verhalten der Stromwandler bei Hochfrequenzen und den Schutzwert von Parallelwiderständen gegen Überspannungen

Autor: Berger, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058644

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

B. Ueber das Verhalten der Stromwandler bei Hochfrequenz und den Schutzwert von Parallelwiderständen gegen Ueberspannungen.

Von *K. Berger*, dipl. Ing., Zürich.

621.319.8 (0068)

Der Autor beschreibt anfangs die Schwingungsfähigkeit eines nicht überbrückten Stromwandlers in Serie mit der Ersatzkapazität eines Netzteils. Dann werden Versuche an Stromwandlern ohne Parallelwiderstand und ohne angeschlossenes Netz mitgeteilt. Diese zeigen, dass sich jeder Stromwandler bei tiefer Frequenz wie eine Drosselspule, bei hoher Frequenz hingegen wie ein zwischen die Primärklemmen geschalteter Kondensator verhält. Dazwischen gibt es eine Grenzfrequenz, bei der der Wandler allein in Stromresonanz schwingt. In der Folge wird der durch Parallelwiderstände zum Stromwandler erzielte Schutz gegen Ueberspannungen untersucht. Der Kompromiss in der Bemessung eines konstanten Widerstandes lässt sich nicht immer lösen, da die Messgenauigkeit der Wandler einen hohen, die genügende Schutzwirkung einen tiefen Widerstandswert fordert. Nur solche Widerstände, deren Höhe mit steigender Spannung abnimmt, können der Aufgabe gerecht werden. Als solche werden die meist benutzten Silitwiderstände untersucht, wobei sich zeigt, dass z. T. ihre Spannungsabhängigkeit, vor allem aber ihre Belastungsfähigkeit für viele Fälle ungenügend ist. Der Autor macht auf die Notwendigkeit einer Verbesserung und Prüfung derselben aufmerksam, um damit Störungen zu verhindern, die heute während Gewittern auftreten. Er nennt als geeignetes Mittel zur Ueberbrückung von Stromwandlern auch passende Edelgasröhren.

L'auteur examine pour commencer le circuit oscillant formé par un transformateur d'intensité non shunté, en série avec une capacité représentant une partie du réseau. Puis il décrit des essais détaillés, portant sur le transformateur d'intensité seul, sans résistance en parallèle et sans le réseau dans lequel il est inséré. Ces essais montrent que tout transformateur d'intensité agit aux basses fréquences comme une self, aux fréquences élevées comme un condensateur; pour une fréquence-limite intermédiaire, il est en résonance. L'auteur parle ensuite de la protection contre les surtensions de choc et à haute fréquence, obtenue au moyen de résistances en parallèle, de valeur constante. Cette valeur doit être faible si l'on veut une protection efficace, élevée si l'on tient à la précision des mesures; d'où la difficulté d'arriver à un compromis. Seules les résistances dont la valeur diminue à mesure que la tension augmente peuvent être prises en considération. Il s'agit notamment des résistances à base de silice et de quartz (silite), étudiées spécialement ici. L'auteur rend attentif à la nécessité d'une amélioration de ces résistances et à un examen systématique de leur capacité de surcharge, pour parer aux dérangements qu'elles occasionnent souvent dans les réseaux à haute tension, en temps d'orage. Il indique enfin une autre solution, dans l'emploi de tube à gaz rares.

I. Einleitung.
II. Das Verhalten des Stromwandlers ohne Parallelwiderstand.
III. Der Schutzwert konstanter Parallelwiderstände.
IV. Schutzwert und Verhalten spannungsabhängiger Schutzwiderstände, speziell der Silitwiderstände.
V. Zusammenfassung.
VI. Anhang: Beitrag zum Spulenproblem der Stromwandler.

I. Einleitung.

Es ist schon früh beobachtet worden, dass an den nicht durch Parallelwiderstände überbrückten Stromwandlern im Betriebe Störungen auftreten, die sich als Ueberschläge zwischen den beiden Klemmen der Primärwicklung oder von der Primärwicklung nach Eisen oder zur Sekundärwicklung äussern. Man hat auch früh erkannt, dass bis zu einem gewissen Grad diese Störungen vermindert werden können durch Widerstände oder Funkenstrecken, die parallel zur Primärwicklung angeordnet sind und diese somit überbrücken.

Doch kommen auch heute noch in Hochspannungsanlagen solche Ueberschläge an den auf diese Art „geschützten" Stromwandlern, sowie Defekte der Parallelwiderstände besonders während Gewittern nicht selten vor. Auf die sehr verdankenswerte Anregung der Bernischen Kraftwerke hin, die das Verhalten der Stromwandler mit Silitwiderständen im Betriebe beobachteten und sich dahin äusserten, dass der Schutzwert dieser Parallelwiderstände sehr zweifelhaft sei, wurde die Frage mit Hilfe des Kathodenstrahl-Oscillographen des S. E. V. näher untersucht.

Der erste Teil der Untersuchung, dessen Durchführung im Laboratorium möglich war, ist bereits abgeschlossen. Ueber den zweiten Teil der Untersuchung, nämlich über Messungen des Verhaltens in Anlagen wird später noch zu berichten sein.

Der im Zug der Leitung liegende Stromwandler kann prinzipiell in 2 Fällen zu gefährlichen Spannungen Anlass geben:

1. Bei Beanspruchung durch Wellen mit steiler Front, sagen wir kurz bei Sprungwellen.
2. Bei Resonanzvorgängen.

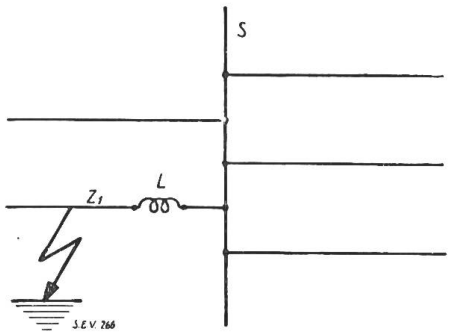

Fig. 1.
Schema einer Durchgangsstation ohne Resonanzgefahr.

Betrachten wir zwei praktisch wichtige Fälle: In der Schaltung nach Fig. 1 (Durchgangsstation) ist bei einem Erd- oder Kurzschluss auf der Leitung Z_1 der Stromwandler L hauptsächlich durch die Entladesprungwelle gefährdet. Infolge der vielen von den Sammelschienen S ausgehenden Abzweigungen und Leitungen ist ein abgegrenzter Schwingungskreis nicht ersichtlich.

In Fig. 2 (Kopfstation) hingegen ist ausser der Gefahr bei Auftreffen einer Sprungwelle aus der Leitung Z_1 auch eine typische Resonanzgefahr vorhanden. Der Stromwandler L kann mit der Erdkapazität des Kabels K und Transformators T zusammen einen Schwingungskreis bilden, mit bestimmter Eigenfrequenz. Nun muss man sich darüber klar sein, dass durch den Erd- oder Kurzschluss auf der Leitung Z_1 in den meisten Fällen ein Spiel vor- und zurücklaufender Wellen entstehen wird, infolge der teilweisen Reflexion derselben am Stromwandler L. Dieses Wellenspiel liefert an der Eingangsklemme L_1 des Stromwandlers eine periodisch ab- und zunehmende Spannung gegen Erde mit zeitlich abnehmender Grösse, also eine Schwingung. Deren Periode ergibt sich einfach aus der 4fachen Laufzeit der Sprungwelle vom Erdschlussort zum Wandler L.

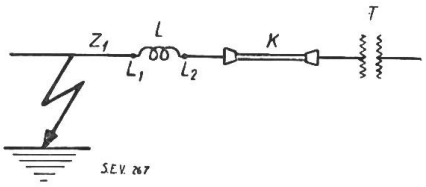

Fig. 2.
Schema einer Kopfstation mit typischer Resonanzmöglichkeit.

Stimmt diese Wanderwellengrundfrequenz ungefähr mit der Eigenfrequenz aus Stromwandler L und dahinter liegender Anlage K und T zusammen, so kann sich die Spannung zwischen den Primärklemmen L_1 und L_2 des Stromwandlers, sowie zwischen den Leitungen K und T und Erde auf gefährliche Werte aufschaukeln.

Für eine offene Leitung hat J. Fallou bereits ein wertvolles Oscillogramm gezeigt über den Verlauf dieser Wanderwellenschwingung am Leitungsende bei plötzlichem Erdschluss am Leitungsanfang [1]).

An einer Leitung Z_1 mit überbrücktem Stromwandler L tritt eine mehr oder weniger vollständige Weiterleitung der Sprungwelle über den Parallelwiderstand in die hinter dem Stromwandler liegende Anlage ein und dadurch auch eine grössere Dämpfung der Wanderwelle. Die Schutzwirkung eines Parallelwiderstandes ist in diesem Fall eine doppelte:

Einmal vermindert er die Schwingfähigkeit des Systems aus Stromwandler und Anlagekapazität, ferner reduziert er die Erregerschwingung, indem er die Reflexion der Wellen am Wandler vermindert, d. h. die Wanderwelle mit geringem Spannungsabfall in die Anlage hineinspazieren lässt.

Das Verhalten des Wandlers bei Hochfrequenz und bei Sprungwellen soll im folgenden getrennt beschrieben werden.

[1]) J. Fallou: A propos des surtensions de résonance engendrées par les ondes transitoires dans les transformateurs. Revue générale d'Electricité, Paris, No. 22, 28 mai 1927.

II. Das Verhalten des Stromwandlers ohne Parallelwiderstand.

a) Verhalten bei Hochfrequenz.

Der nicht überbrückte Stromwandler stellt nach der landläufigen Auffassung eine Drosselspule dar, die befähigt ist, mit einer in Serie geschalteten Kapazität Schwingungen auszuführen. Die Anordnung ist wiedergegeben durch das prinzipielle Schema der Fig. 3, das dem Anlagenschema der Fig. 2 entspricht, sofern an Stelle der Erdkapazität von Kabel und Transformator eine konzentrierte Kapazität C_e eingeführt werden darf. Eine Hochfrequenzquelle G kann das System zum Schwingen bringen. Nach diesem Schema wurde dann auch die Schwingfähigkeit des Stromwandlers untersucht. Als Hochfrequenzquelle G wurde ein besonderer Röhrensender benützt. Auf diese Weise war es möglich, die zur Verfügung stehenden 6 Stromwandler bei Frequenzen bis über eine Million zu beobachten. Die benützte Kapazität C_e bestand aus Luft- und Glimmer-Kondensatoren, deren Kapazitätswert variierte bis zu maximal ca. 160 000 cm, was ungefähr der Erdkapazität von 1 km Kabel oder 20 km Freileitung entspricht.

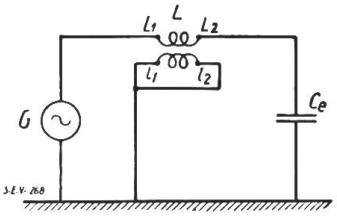

Fig 3.
Ersatzschema des Schwingkreises aus Stromwandler und Netz.

Die zahlreichen Messungen wurden mit Hilfe des Kathodenstrahl-Oscillographen durchgeführt und zwar in der Weise, dass für einen konstanten Kapazitätswert C_e der Generator G auf die Eigenfrequenz von L und C_e abgestimmt wurde. Die auftretenden Spannungen wurden mit Hilfe des Oscillographen gemessen, die Frequenzen mit 2 Wellenmessern, wovon der eine ein Fabrikat S. & H. war, während der andere, ein Seibt-Wellenmesser, in freundlicher Weise von J. Nölting in Meilen zur Verfügung gestellt wurde.

Diese Versuche ergaben, dass jeder Stromwandler in einem bestimmten Frequenzgebiet am besten zu Resonanzschwingungen befähigt ist. Dieses Gebiet wurde für 5 Stromwandler in total 7 Schaltungen festgestellt. Die Schwingfähigkeit kann zahlenmässig am besten dargestellt werden durch das Verhältnis der erregten Resonanzspannung über die Primärwicklung des Stromwandlers zur anregenden Spannung des Hochfrequenz-Generators. Dieses Verhältnis entspricht dem von J. Fallou eingeführten Facteur de surtension M[2]). Der Betrag dieses Faktors ist bei Frequenzen unter 1000 klein; er wächst aber mit steigender Frequenz, erreicht dann für die meisten Wandler ein Maximum und sinkt wieder, wenn die Frequenz noch höher gewählt wird. Das genannte Maximum dieses Ueberspannungsfaktors beträgt für die verschiedenen Wandler 6 bis 20. In diesem Verhältnis ist die erregte Resonanzspannung über den Stromwandler oder auch an der Kapazität C_e grösser als die anregende Spannung. Die Schwingfähigkeit des Stromwandlers ist also eine ganz beträchtliche. Je nach der Art und Länge der Primärwicklung tritt dieses Maximum der Resonanzschärfe auf bei Frequenzen von ca. 5000 bis ca. 100000.

Geht man mit der Kapazität C_e zu noch kleineren Werten, d. h. erhöht man die Eigenfrequenz des Systems $L-C_e$ noch weiter und regt immer wieder mit Eigenfrequenz an, so nimmt die Schwingfähigkeit stetig ab und zwar bis gegen 0. Dies bedeutet, dass es eine *Grenzfrequenz* gibt in dem Sinn, dass nur bei tieferen Frequenzen der Wandler sich wie eine Drosselspule verhält. Diese Grenzfrequenz liegt bei den untersuchten Stromwandlern bei 20000 bis 1400000 Perioden. Sie ist tief für die Wandler mit vielen Windungen und Lagen, hoch für die Wandler mit grösserem Primärnennstrom. Diese interessante Erscheinung veranlasste dann eine Untersuchung des Stromwandlers allein, ohne Seriekapazität oder Netz. Da diese Messungen auch theoretisches Interesse besitzen, sind sie samt den bereits erwähnten Resonanz-Spannungsmessungen in einem Anhang dieser Arbeit beigefügt.

Zusammenfassend soll hier nur erwähnt werden, dass sich die untersuchten Stromwandler bezüglich ihres Verhaltens bei Hochfrequenz darstellen lassen durch

[2]) J. Fallou l. c.

das Ersatzschema der Fig. 4. L_1 und L_2 sind die beiden Klemmen der Primärwicklung. (L_2 war bei den Versuchen geerdet, ebenso der Kübel und die kurzgeschlossene Sekundärwicklung.) r und L können als Widerstand und Induktivität des sekundär kurzgeschlossenen Wandlers bei der betreffenden Frequenz angesehen werden. C_w ist eine Kapazität, die man als eine Art Windungs- oder Lagenkapazität anzusprechen hat und die fähig ist, bei hoher Frequenz einen beträchtlichen Strom quer zu den Drähten der Primärwicklung von L_1 nach L_2 zu führen. Bei der oben genannten Grenzfrequenz ist dann gerade die Bedingung erfüllt, dass C_w gleichviel Verschiebungsstrom führt wie L induktiven. Es herrscht Stromresonanz im Stromwandler. Bei tieferer Frequenz fliesst mehr Strom über L: Der Wandler verhält sich wie eine Drosselspule; bei höherer Frequenz überwiegt der Strom durch C_w: Dann wirkt die Wicklung wie ein Kondensator. Es soll nochmals betont werden, dass dieses Verhalten und Ersatzschema gilt für den Stromwandler allein, ohne irgend ein Netz oder andere Zutaten. Die Kapazität C_w liegt im Stromwandler selber. Ueber Literaturstellen zum Spulenproblem, sowie Einzelheiten der Messanordnung siehe den Anhang. Interessant ist, dass es Stromwandlerspulen gibt, die sich schon bei 20000 Perioden in Stromresonanz befinden. Man ist also gar nicht berechtigt, einen Stromwandler ohne weiteres für hochfrequente Schwingungen als Drosselspule zu betrachten.

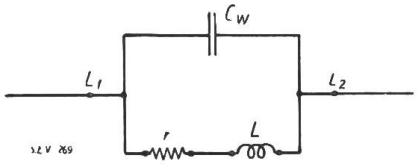

Fig. 4.
Durch die Versuche erwiesenes Ersatzschema für das Verhalten des Stromwandlers bei Hochfrequenz.

In Anlagen übernehmen die Wanderwellen die Rolle des Hochfrequenz-Generators. Da der nicht überbrückte Stromwandler jede auftreffende Wanderwelle beinahe in voller Höhe reflektiert, hat die Amplitude der anregenden Schwingungsspannung fast den vollen Wert der Wanderwellenspannung. Diese wieder erreicht Werte, die zwischen der Phasenspannung und der Ueberschlagsspannung des Netzes liegen, je nachdem es sich um plötzlichen Erdschluss ohne besondere Ueberspannung auf der Leitung oder um Erdschluss bei Störungen mit überschüssigen Ladungen auf der Leitung handelt (z. B. Gewitter). Die an der Primärwicklung des nicht überbrückten Stromwandlers auftretende Spannung könnte also, ebenso wie die Spannung der hinter ihm liegenden Anlage gegen Erde, annähernd die 6 bis 20fache Phasenspannung, ja sogar 6 bis 20fache Ueberschlagsspannung des Netzes erreichen. Praktisch werden natürlich lang vorher an Stromwandlern oder Anlageteilen Ueberschläge auftreten.

Sollen Ueberschläge am Stromwandler oder im dahinterliegenden Netzteil infolge von Wanderwellenresonanz vermieden werden, so muss der Wandler unbedingt überbrückt sein. Der Einwand, dass nur eine bestimmte Wanderwellenfrequenz gefährlich sei, ist zurückzuweisen, da das Gebiet der immer noch unzulässig hohen, gefährlichen Resonanzspannungen ein recht breites ist. Das Vertauschen der Primärklemmen L_1 und L_2 macht wenig aus auf die Höhe der Impedanz und Resonanzspannung. Ein Einfluss der Sekundärbelastung des Wandlers auf sein Verhalten ist nur bei tiefen Frequenzen merklich.

b) Verhalten des Stromwandlers bei Sprungwellen.

Die an den Klemmen des nicht überbrückten Wandlers auftretende Spannung erreicht im Grenzfall, d. h. bei vollständiger Reflexion langer Sprungwellen den doppelten Wert der Sprungwellenhöhe. Dieses durch die Theorie behauptete Verhalten ist durch Versuche von H. Gewecke [3]) durch Spannungsmessung mit Kugelfunkenstrecke, sowie durch andere Sprungwellenversuche und in neuester Zeit durch Wanderwellen-Oscillogramme von Rogowski [4]), wenn auch nicht gerade an Strom-

[3]) H. Gewecke, E.T.Z. 1914, Seite 386.

[4]) W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, Bd. 18, Heft 5, Juni 1927.

wandlerspulen, bestätigt worden. Der Unterschied gegenüber der von Rogowski untersuchten Spule wird sich darin zeigen, dass die in den Figuren 30 bis 36 des Anhanges erwiesene Wicklungskapazität zwischen den Klemmen L_1 und L_2 beim Auftreffen einer Sprungwelle den Wellenkopf durch die Spule durchtreten lässt. Dieser Stoss, der rechnungsgemäss nur die ersten Meter der Sprungwelle umfasst, bringt die Klemmen der Primärwicklung gegeneinander auf die erwähnte Spannung. Eine Ueberbrückung der Primärwicklung ist nötig, wenn man Ueberschläge zwischen deren Klemmen verhindern will. Dies ist in grossen Hochspannungsnetzen erforderlich, weil die Feuererscheinung bei solchen Ueberschlägen zwischen den Primärklemmen die Gefahr des Ueberschlags von den Primärklemmen nach Eisen in sich trägt, also zu Erd- und Kurzschlüssen führt.

III. Der Schutzwert konstanter Parallelwiderstände.

a) Zulässige Grösse des Parallelwiderstandes bezüglich Messgenauigkeit des Stromwandlers.

Der parallel zur Primärwicklung des Stromwandlers geschaltete Widerstand entzieht letzterm einen Teil des Stromes und bedingt dadurch Messfehler. Diese äussern sich als zusätzliche Uebersetzungs- und Winkelfehler. Die Uebersetzung wird derart gefälscht, dass der Wandler zu wenig Strom misst. Ferner bewirkt der Parallelwiderstand für sich einen negativen Fehlwinkel des Wandlers, d. h. der vom Wandler gelieferte Messtrom wird gegenüber dem zu messenden primären Totalstrom zusätzlich verzögert.

Bezeichnet man, wie es in Fig. 5 geschehen ist, mit V, I und $\cos\varphi$ die zwischen den Primärklemmen gemessenen Werte von Spannung, Strom und Phasenverschiebung des Wandlers ohne Parallelwiderstand im Betriebszustand und mit R die Grösse des Parallelwiderstandes, so wird der zusätzliche Uebersetzungsfehler:

$$\Delta\ \ddot{u} = \frac{I_1 - I}{I} = \frac{V \cos\varphi}{I\ R}\ 100\,\%.$$

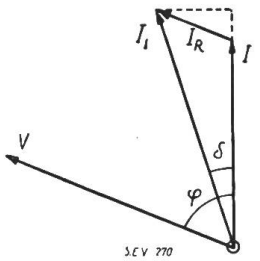

Fig. 5.
Vektordiagramm der Messfehler infolge der Parallelwiderstände an Stromwandlern.

Und der vom Parallelwiderstand herrührende Fehlwinkel:

$$\delta \simeq \operatorname{tg}\delta = \frac{I_R \sin\varphi}{I} = \frac{V \sin\varphi}{I\ R} \quad \text{(in abs. Winkeleinheiten).}$$

Die Grössen der Fig. 5 bedeuten:

V = Spannung zwischen den Primärklemmen des Stromwandlers.

I_1 = Vom Stromwandler zu messender Primärstrom.

I_R = Teilstrom über den Parallelwiderstand R.

I = Teilstrom durch den Stromwandler.

φ = Primärer Phasenwinkel des Stromwandlers ohne Parallelwiderstand im normalen Betrieb.

δ = Vom Parallelwiderstand herrührender Fehlwinkel.

Die Werte V, I, $\cos\varphi$ sind für jeden Wandler ungefähr bekannt. Sie hängen weniger von der Sekundärbelastung des Wandlers als von seiner Wicklungsimpedanz ab, weil der Spannungsabfall im Wandler überwiegt.

Die untersuchten Wandler zeigen folgende, bei der Sekundärlast = 0 gemessenen Werte (Kurzschlussversuch):

Nr.	f ~	V Volt	I Amp.	cos φ	VA	Watt	$\frac{V \cos \varphi}{I}$ Ohm	$\frac{V \sin \varphi}{I}$ Ohm	Nennlast in VA	Nennlast in Ohm primär
1	$16^2/_3$	56,1	10	0,396	561	222	2,22	5,15	60	0,6 Ohm
2	$16^2/_3$	30,0	10	0,503	300	151	1,51	2,59	60	0,6 Ohm
3	50	3,375	15	0,555	50,6	28	0,125	0,187	16–20	0,071 –0,089
4	50	5,2	25	0,421	130	55	0,0877	0,189	16–20	0,0256–0,032
	50	2,68	50	0,456	134	61	0,0244	0,0477		0,0064–0,008
	50	1,41	100	0,503	141	71	0,0071	0,0121		0,0016–0,002
5	50	1,37	100	0,543	137	74	0,0074	0,0115	80	0,008
6[1]	50	7,0	150	ca. 0,2	1050	ca. 210	ca. 0,0093	ca. 0,046	80	0,00356

[1]) No. 6 fällt aus der Reihe, da es sich hier um einen Mehrfach-Stabstromwandler handelt; während die übrigen 5 Oelstromwandler sind.

Um die Grösse des Parallelwiderstandes R zu bestimmen, muss man Annahmen über einen höchstzulässigen Messfehler durch den Parallelwiderstand machen. Hier muss unterschieden werden zwischen jenen Stromwandlern, die zur Speisung von Zählern, Wattmetern usw. dienen, nach denen der Strom verrechnet wird (Präzisionswandler) und jenen andern, die lediglich Relais, Signale und Kontrollinstrumente zu speisen haben. In Anbetracht dessen, dass es sich beim Parallelwiderstand um einen zusätzlichen Messfehler des Stromwandlers handelt, sind für Präzisionswandler folgende Werte angenommen:

Höchstzulässiger zusätzlicher Uebersetzungsfehler bei Nennlast = $^1/_4\,^0/_0$ [5])
Höchstzulässiger zusätzlicher Winkelfehler bei Nennlast = 10′

So ergeben sich für die Wandler die tiefstliegenden Parallelwiderstände aus:

$$R = \frac{V \cos \varphi}{I} \; \frac{1}{0{,}0025} = 400 \left(\frac{V \cos \varphi}{I} \right) \text{ bezüglich Uebersetzungsfehler}$$

$$R = \frac{V \cos \varphi}{I} \; \frac{1}{0{,}0029} = 345 \left(\frac{V \sin \varphi}{I} \right) \text{ bezüglich Winkelfehler}$$

Der grössere von den beiden sich ergebenden Werten ist zu wählen.

Wird die Nennlast der Wandler einmal als rein ohmisch, dann als rein induktiv angenommen, so ergeben sich damit die in folgender Tabelle eingetragenen tiefstzulässigen Parallelwiderstände. Die nicht in Klammern gesetzten Werte gelten.

Wandler No.	Bei rein ohmscher Nennlast: $\frac{V \cos \varphi}{I}$ Ohm	$\frac{V \sin \varphi}{I}$ Ohm	R min Ohm		Bei rein induktiver Nennlast: $\frac{V \cos \varphi}{I}$ Ohm	$\frac{V \sin \varphi}{I}$ Ohm	R min Ohm	
1	2,82	5,15	1780	(59)	2,22	5,75	1980	(65,5)
2	2,11	2,59	895	(42)	1,51	3,19	1100	(36)
3	0,214	0,187	85,5	(4,3)	0,125	0,276	95	(3,15)
4	0,120	0,189	65	(2,3)	0,0877	0,221	76	(2,5)
	0,0324	0,0477	16,5	(0,65)	0,0244	0,0557	19,2	(0,64)
	0,0091	0,0121	4,2	(0,18)	0,0071	0,0141	4,9	(0,16)
5	0,0154	0,0115	6,2	(0,31)	0,0074	0,0195	6,7	(0,22)
6	ca. 0,013	ca. 0,046	16	(0,52)	ca. 0,0093	ca. 0,050	17,2	(0,57)

[5]) Ersterer Wert in Uebereinstimmung mit H. Gewecke l. c.

Die gültigen (höhern) Widerstandswerte sind unterstrichen.

Wie man sieht, liegen die tiefstzulässigen Parallelwiderstände für Präzisionswandler bei Nennlast je nach Primärstrom, Leistung und Frequenz des Wandlers zwischen 2000 und 5 Ohm.

Die Forderung eines höchstzulässigen zusätzlichen Winkelfehlers von 10′ ist in den meisten Fällen etwas strenger als die Forderung des höchstzulässigen zusätzlichen Uebersetzungsfehlers von $^1/_4$ %. Ferner erfordert die induktive Belastung des Wandlers einen etwas höheren Parallelwiderstand, um die gleiche Messgenauigkeit inne zu halten. Die an den Wandlern befindlichen, von den Betriebsleitungen oder den Fabriken angebrachten Silit-Widerstände haben zum grössten Teil höhere als die gerechneten Widerstandswerte. Wo dies nicht zutrifft, ist der in der Rechnung für Präzisionswandler zugrunde gelegte zusätzliche Messfehler erreicht oder überschritten.

Für die zweite Art Stromwandler, die nur zur Speisung von Relais, Kontrollinstrumenten und Signalen dienen, kann ein grösserer Messfehler zugelassen werden. Dies erlaubt, kleinere Werte der Schutzwiderstände anzuwenden. Z. B. ergeben sich bei Zulassung von 5 % Uebersetzungs- und 5° Winkelfehler die eingeklammerten Widerstandswerte der letzten Tabelle. Diese Werte sind bereits so tief, dass der Erwärmung des Widerstandes Rechnung getragen werden muss. Da der bei normalem Betrieb durch den Parallelwiderstand fliessende Strom jetzt ca. 7 % des zu messenden Stroms ausmacht, beträgt die Wärmeentwicklung im Parallelwiderstand je nach dem Wandler ca. 3 bis 80 Watt. Dies würde z. B. für die Silit-Widerstände mit 65 mm Länge und 30 mm Durchmesser eine Erwärmung um ca. 15 bis über 400° bewirken, was für den Dauerbetrieb wohl unzulässig ist.

b) Spannungsreduktion durch den Parallelwiderstand bei Hochfrequenz.

Ueber die Reduktion der Resonanzspannung durch den Parallelwiderstand wurden ausführliche Versuche angestellt. Die auftretenden Spannungen wurden sofort nacheinander mit und ohne Parallelwiderstand gemessen, und zwar mit verschiedenen Werten desselben. Die Messungen erstrecken sich auf Frequenzen bis ca. 300 000. Es wurden besondere induktionsarme Widerstände hergestellt, deren Phasenwinkel bei 10^5 Perioden ca. 1 % beträgt. Ferner wurden als Parallelwiderstände auch Silitstäbe verwendet, deren Widerstand dann bei den betreffenden Frequenzen und Spannungen bestimmt wurde.

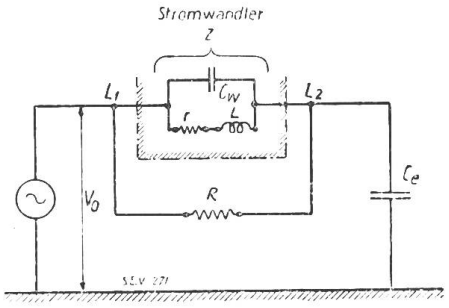

Fig. 6.
Schema zur Rechnung der Spannungsreduktion bei Hochfrequenz durch Parallelwiderstände.

Die Versuche zeigen, dass sich die Spannungsreduktion, sowie die Höhe der noch verbleibenden Schwingspannungen rechnen lässt. Die Rechnung ist einfach bis in die Nähe der Grenzfrequenz f_0 des Wandlers. Sie kann in diesem Fall nach dem einfachen Schwingungskreis-Schema der Fig. 6 erfolgen.

Darin bedeuten:

L = Induktivität
r = Widerstand
C_w = Wicklungskapazität
Z = Aus L, r und C_w resultierende Impedanz
R = Parallelwiderstand

} des Stromwandlers zwischen L_1 und L_2

Mit den Bezeichnungen dieser Figur beträgt die Reduktion Q der zwischen den Primärklemmen L_1 und L_2 des Wandlers auftretenden Spannung, wenn ein Parallelwiderstand R angebracht wird:

$$Q = \frac{R}{R + Z\frac{Z}{r}} = \frac{\text{Auftretende Spannung mit Parallelwiderstand}}{\text{Auftretende Spannung ohne Parallelwiderstand}}.$$

Die noch auftretende Schwingspannung an den Primärklemmen L_1 L_2 beträgt bei Vorhandensein des Parallelwiderstandes R im Verhältnis zur anregenden Generatorspannung V_0 (siehe Fig. 6):

$$\frac{V_L}{V_0} = \frac{Z}{r} Q = \frac{Z}{r} \frac{R}{R + Z\frac{Z}{r}}.$$

Die Werte Z und $\frac{Z}{r}$ sind in den Fig. 30 bis 36 für die gemessenen Wandler aufgetragen und können dort entnommen werden. Die zwei Resultate haben zur Voraussetzung, dass $\frac{Z}{r} \gg 1$ ist, was im Gebiet unter der Grenzfrequenz f_0 zutrifft, wie aus den Fig. 30 bis 36 zu ersehen ist.

Auf das Verhalten bei der Grenzfrequenz kann hier nicht eingegangen werden; es bietet mehr theoretisches als praktisches Interesse. Die mit vorhandenem Parallel-

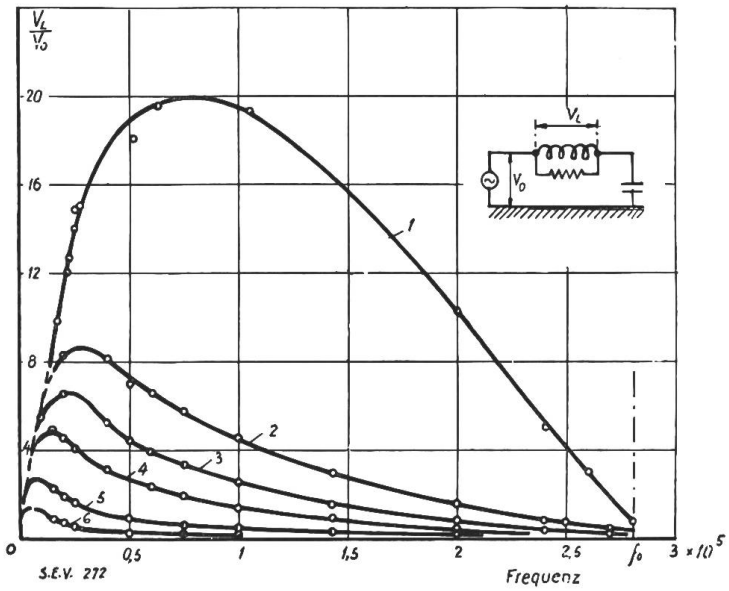

Fig. 7.

Auftretende Resonanzspannungen am Stromwandler No. 3 bei Benützung verschiedener Parallelwiderstände.

Kurve 1: Ohne Parallelwiderstand.
„ 2: Mit 2000 Ω Parallelwiderstand.
„ 3: „ 1000 Ω „
„ 4: „ 500 Ω „
„ 5: „ 150 Ω „
„ 6: „ 50 Ω „

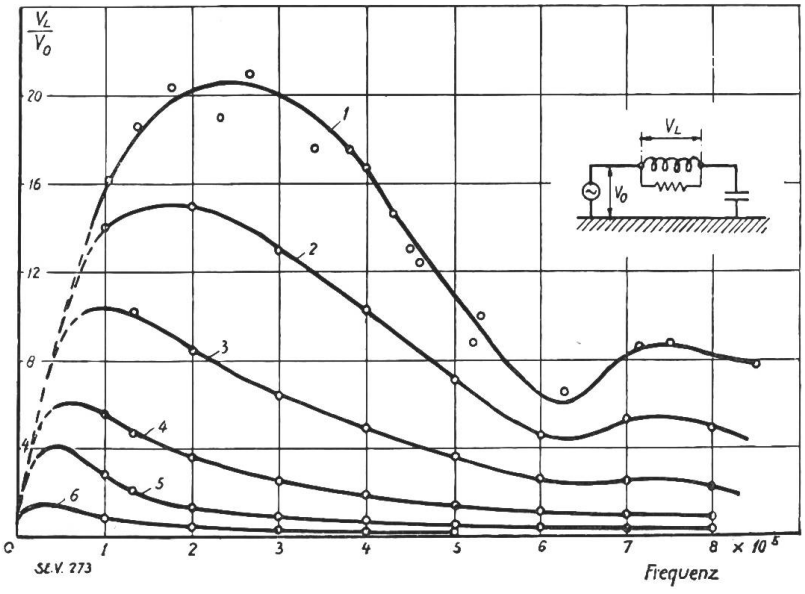

Fig. 8.

Auftretende Resonanzspannungen am Stromwandler No. 4 bei Schaltung $^{100}/_{5}$ A, bei Benützung verschiedener Parallelwiderstände.

Kurve 1: Ohne Parallelwiderstand.
„ 2: Mit 2000 Ω Parallelwiderstand.
„ 3: „ 500 Ω „
„ 4: „ 150 Ω „
„ 5: „ 50 Ω „
„ 6: „ 15 Ω „

widerstand R noch auftretende Schwingspannung am Stromwandler L_1 L_2 ist nach diesen Angaben für zwei Stromwandler in den folgenden zwei Fig. 7 und 8 dargestellt. Die bei den Versuchen benützten Parallelwiderstände hatten die Widerstandswerte 2000, 1000, 500, 150, 50, 15 und 5 Ω.

Aus Versuch und Rechnung ergibt sich übereinstimmend, dass die Parallelwiderstände die Schwingspannungen bei *hohen* Frequenzen bedeutend herabsetzen, den Stromwandler hier also wirksam schützen. Bei *tiefen* Frequenzen hingegen ist die auftretende Spannung an den Primärklemmen trotz Parallelwiderstand noch recht beträchtlich.

Für eine bestimmte Eigenfrequenz (50000 Per.) des Schwingungskreises aus Stromwandler und Anlageersatzkapazität C_e gibt Fig. 9 die erzeugten Spannungen, wenn mit Frequenzen von der ungefähren Grösse der Eigenfrequenz erregt wird (Resonanz-Kurve).

Die Kurven 1 und 2 zeigen die ausgeprägten Resonanzspannungen zwischen den Stromwandlerklemmen einerseits und an der Kapazität C_e gegen Erde anderseits, ohne Parallelwiderstand, die Kurven 3 und 4 mit einem Parallelwiderstand $R = 500$ Ohm, ferner die Kurven 5 und 6 bei einem Parallelwiderstand $R = 150$ Ohm.

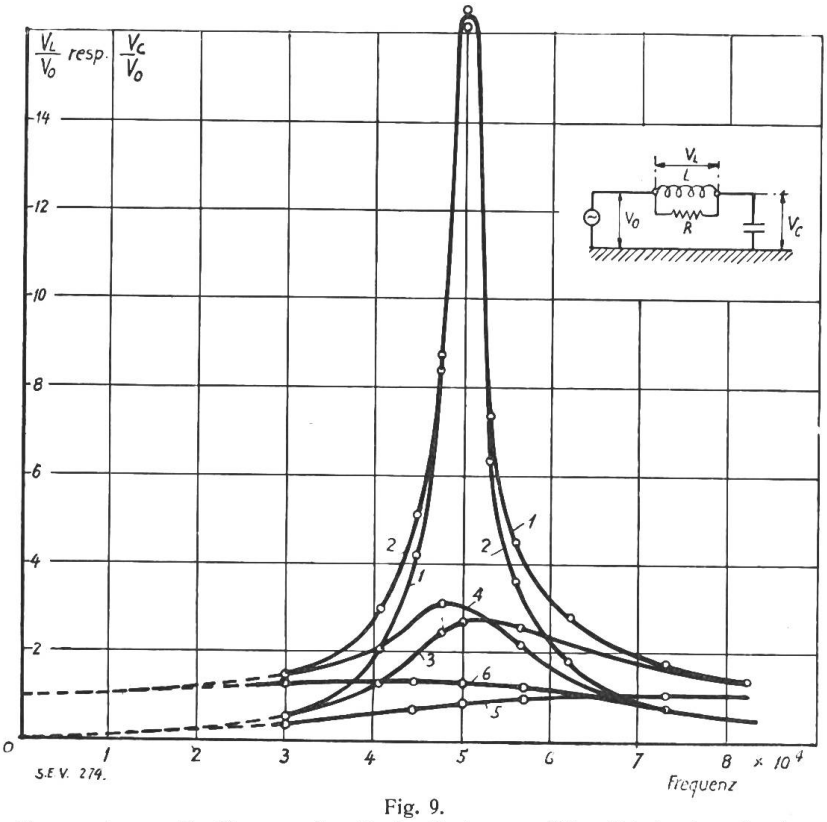

Fig. 9.
Resonanzkurven für Stromwandler No. 3 mit einer ca. 100 m Kabel entsprechenden Kapazität, Eigenfrequenz 50 000 Perioden.

Kurve 1:	Spannung am Stromwandler	Ohne Parallelwiderstand
Kurve 2:	Spannung an der Kapazität	$R = \infty$
Kurve 3:	Spannung am Stromwandler	Mit Parallelwiderstand
Kurve 4:	Spannung an der Kapazität	$R = 500\ \Omega$
Kurve 5:	Spannung am Stromwandler	Mit Parallelwiderstand
Kurve 6:	Spannung an der Kapazität	$R = 150\ \Omega$

Im letztern Fall ist eine Resonanz kaum mehr zu erkennen, weil der Ueberbrückungswiderstand bereits so klein ist, dass sich der Schwingungskreis dem aperiodischen Verhalten nähert. Nach *Campos* beträgt der kritische Ueberbrückungswiderstand, der den Kreis vollständig am Schwingen hindert:

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{Z}{2}$$

Die Impedanz Z kann wieder aus den Fig. 30 bis 36 des Anhanges entnommen werden. Sie beträgt für das Beispiel der Fig. 9 ca. 160 Ω (Fig. 32). Der kritische Ueberbrückungswiderstand liegt also bei $\frac{160}{2} = 80\ \Omega$. Das ist ca. die Hälfte des Widerstandes der Kurven 5 und 6 in Fig. 9. Aus allen Kurven ergibt sich eine sehr gute Uebereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung, sofern für die Impedanzen Z die gemessenen, bei den betreffenden Frequenzen vorhandenen Werte eingesetzt werden. Der Parallelwiderstand vermindert die auftretenden Resonanzspannungen beträchtlich. Die reduzierten Spannungen treten aber in einem relativ breiten Frequenzgebiet auf.

In den Netzen können hochfrequente Schwingungen entstehen durch Erd- und Kurzschlüsse, vielleicht auch durch direkte Blitzeinwirkung, sofern nämlich die Blitzentladung an sich periodische Spannungen erzeugen kann, was nach dem heutigen Stand der Forschung zwar unwahrscheinlich ist. In allen Fällen sind diese Schwingungen gedämpft und in verzweigten Netzen sehr kompliziert. Aus den Versuchen ergibt sich, dass infolge des Parallelwiderstandes die Schwingungsgefahr für *hohe* Frequenzen der Grössenordnung 10^5 und darüber nicht gross ist.

Ein sicheres Urteil über Genügen oder Nichtgenügen des Stromwandlerschutzes durch den Parallelwiderstand lässt sich auf Grund des Verhaltens bei hochfrequenten Schwingungen nicht geben, infolge mangelnder Kenntnis der Grösse und Dämpfung vorkommender Schwingungen. Wir werden aber sogleich sehen, dass schon die Beanspruchung durch lange Sprungwellen Anforderungen bezüglich Grösse und Belastbarkeit an die Parallelwiderstände stellt, denen diese heute oft nicht genügen und die sich zum Teil überhaupt nicht mit den verfügbaren Widerständen erfüllen lassen.

c) Spannungsreduktion durch den Parallelwiderstand bei Sprungwellen.

Da die Primärspule des Stromwandlers für eine auftreffende Sprungwelle ein Leitungsende bedeutet (abgesehen vom kurzen Stromstoss über die Wicklungskapazität), so muss der Parallelwiderstand allein für die Weiterleitung der Sprungwelle, d. h. für die Verhinderung der Reflexion genügen.

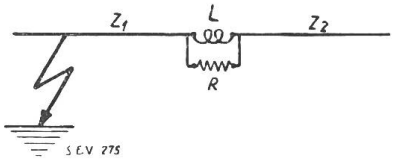

Fig. 10.
Schema zur Berechnung des Verhaltens von Stromwandlern mit Parallelwiderstand bei Sprungwellen aus angeschlossenen Leitungen.

Das Verhalten bei Sprungwellen ist aus Fig. 10 ersichtlich. Trifft aus der Leitung Z_1 eine Sprungwelle auf den Widerstand R, so wird sie zum Teil zurückgeworfen, zum Teil fliesst der Wellenstrom über R weiter zur Leitung Z_2.

Wird mit V die Höhe der einfallenden Sprungwelle bezeichnet, so beträgt der über den Widerstand R weiterfliessende Strom i:

$$i = \frac{2\,V}{Z_1 + Z_2 + R}$$

und der durch diesen Strom hervorgerufene Spannungsabfall an R, d. h. an den Stromwandlerklemmen:

$$V_R = \frac{2\,R}{Z_1 + Z_2 + R}\,V.$$

Diese Ausdrücke erreichen ihre grössten Werte in dem Fall, wo hinter dem Stromwandler, d. h. auf der Seite der Leitung Z_2 sofort starke Verzweigungen vorhanden sind, so dass näherungsweise statt der Leitung Z_2 eine Kapazität ($Z_2 = 0$) angenommen werden darf für die erste Zeit des Vorganges. Mit diesem Fall wird man praktisch rechnen müssen. Dann wird:

$$i = \frac{2\,V}{Z_1 + R} \text{ und } V_R = \frac{2\,R}{Z_1 + R}\,V.$$

Nun hat man es in der Hand, durch die Wahl des Parallelwiderstandes R die auftretende Spannung zwischen den Stromwandlerklemmen festzulegen. Die Spannung V der Sprungwelle erreicht praktisch Werte von weniger als Betriebsspannung (bei Schaltvorgängen) bis zur Ueberschlagsspannung der Leitung (bei Erdschlüssen infolge Gewitters). Mit letzterm Wert muss gerechnet werden.

Lassen wir zwischen den Stromwandler-Primärklemmen $^1/_{10}$ der Leitungsüberschlagsspannung als höchstzulässigen Wert auftreten, so wird:

$$\frac{V_R}{V} = 0{,}1 : R = \frac{Z_1}{19},$$

d. h. für Freileitungen (Z_1 = ca. 500 Ohm): R = ca. 26 Ohm[6])
und für Kabel (Z_1 = ca. 50 Ohm): R = ca. 2,6 Ohm[6])

Diese Widerstandswerte müssen bei auftreffenden Sprungwellen vorhanden sein, damit die Spannung zwischen den Stromwandlerklemmen nicht höher als $^1/_{10}$ der Sprungwellenhöhe wird. Dieser an sich willkürliche Wert $^1/_{10}$ scheint nicht zu tief zu sein, wenn man bedenkt, dass damit zwischen den Stromwandlerklemmen Spannungen bis ca. 13 kV (in 50 kV-Netzen) und ca. 25 kV (in 110 kV-Netzen) maximal zugelassen werden. Denn die Sprungwellenhöhe kann in jedem Netz die Höhe der Ueberschlagsspannung erreichen, die in einem 50 kV-Netz ca. 130 kV und in einem ungeerdeten 110 kV-Netz ca. 250 kV beträgt.

Für Hochspannungsnetze mit Betriebsspannungen bis ca. 15 kV dürften prozentual höhere Spannungen am Stromwandler und damit etwas höhere Widerstandswerte zugelassen werden. $^1/_{10}$ der Ueberschlagsspannung würde in solchen Netzen 3 bis 5 kV entsprechen, welche Spannungen dem Stromwandler kaum gefährlich sind. *Für Hochspannungsnetze über ca. 15 kV jedoch stellen die Werte 26 Ohm an Freileitungen und 2,6 Ohm an Kabeln ungefähr die obere Grenze der Werte dar, die vom Parallelwiderstand eingehalten werden müssen, damit der Schutz genügend wirksam wird.* Bei spannungsabhängigen Widerständen, wie z. B. solchen aus Silit, muss dieser Widerstandswert bei den auftretenden Spannungen erreicht werden, bei tiefer Spannung kann er höher sein. Darauf soll im nächsten Abschnitt eingegangen werden. Dass Spannungen dieser Grösse am Stromwandler gemessen werden können, beweisen die Messungen von H. Gewecke[7]), wenn darin die Spannungsabhängigkeit der benützten Silit-Widerstände berücksichtigt wird. Aufnahmen mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen stehen noch aus.

Die kurze Rechnung zeigt beim Vergleich mit den Forderungen der Widerstandswerte bezüglich Messgenauigkeit (Kap. III, a), dass es bei Präzisionswandlern in vielen Fällen nur auf Kosten der Messgenauigkeit möglich ist, einen konstanten Parallelwiderstand derart zu bemessen, dass er den Stromwandler in Hochspannungsnetzen wirksam schützt. Der Kompromiss zwischen Messgenauigkeit des Wandlers und genügendem Schutzwert lässt sich nicht immer lösen, am wenigsten einerseits bei Präzisionswandlern kleiner Primärströme und grosser Leistung, weil solche Wandler wegen der Messgenauigkeit einen hohen Parallelwiderstand verlangen (siehe unter III, a), und andererseits in Kabelnetzen, die einen tiefen Betrag des Parallelwiderstandes zwecks genügender Schutzwirkung fordern. *Hingegen ist es bei Zulassung von 5 % Uebersetzungs- und 5° Winkelfehler meistens möglich, den Ohmwert des Parallelwiderstandes so niedrig zu bemessen, dass die Schutzwirkung des Widerstandes ausreicht.* Nur für die zwei untersuchten Wandler mit Betriebsfrequenz $16^2/_3$ würde auch der für diese Messfehler abgestimmte Parallelwiderstand noch nicht genügend gegen Ueberspannungen schützen.

Es ist Zufall, wie sich aus der erwähnten Arbeit von H. Gewecke ergibt (E.T.Z. 1914, S. 387, Fussnote unten), dass man in der Praxis, ohne es zuerst zu wissen, spannungsabhängige Widerstände in Form der Silit-Produkte angewendet hat. Diese können der Aufgabe deshalb eher gerecht werden, weil sie den Kompromiss dadurch lösen, dass sie bei den im normalen Betriebe vorkommenden tiefen Spannungen einiger Volt zwischen den Stromwandlerklemmen einen hohen Widerstand besitzen, der bei hohen Spannungen praktisch momentan zurückgeht auf viel kleinere Werte. Ob sich der Stromwandlerschutz mit Silit-Widerständen einwandfrei lösen lässt, wurde deshalb noch besonders untersucht.

[6]) Bei der Korrektur finde ich, dass Petersen bereits im Jahr 1913 Werte der Ueberbrückungswiderstände von 30 resp. 3 Ω gefordert hat. Siehe E. T. Z. 1913, Seite 206.

[7]) H. Gewecke l. c.

IV. Schutzwert und Verhalten spannungsabhängiger Parallelwiderstände, speziell der Silit- und Quarzilit-Widerstände.

a) Schutzwert bei Hochfrequenz und Sprungwellen.

Ueber den Schutzwert der spannungsabhängigen Widerstände ist das in Abschnitt III Gesagte zu wiederholen, wobei als Widerstandswert der bei den auftretenden Spannungen und Frequenzen vorhandene zu nehmen ist. Es handelt sich also hier darum, die Grösse der Veränderung des Widerstandswertes bei allen vorkommenden Spannungen und event. Veränderungen mit hoher Frequenz festzustellen. Ferner ist das sonstige Verhalten solcher Widerstände bei der eigenartigen kurzzeitigen Belastung durch Sprungspannungen zu beobachten.

b) Spannungsabhängigkeit des Widerstandswertes.

Zu dieser Untersuchung eignet sich der Kathodenstrahl-Oscillograph gut, da er gestattet, in einem Oscillogramm den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom bis zu den für den Widerstand höchstzulässigen Spannungen darzustellen. Lassen wir nämlich den Kathodenstrahl in der X-Richtung von der am Widerstand herrschenden Spannung ablenken, während er in der Y-Richtung vom Strom durch den Widerstand abgelenkt wird, so erhalten wir direkt den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom in rechtwinkligen Koordinaten, d. h. die Charakteristik des Widerstandes.

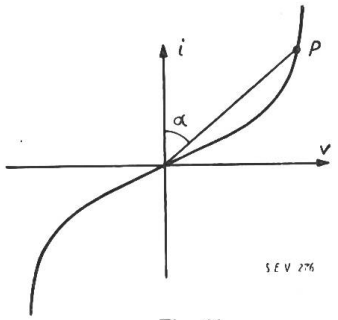

Fig. 11.
Charakteristik eines Widerstandes, dargestellt in einem Achsenkreuz mit *V*- und *I*-Achsen.

Die Neigung gegen die Stromaxe des Strahles vom Nullpunkt zu irgend einem Punkt dieser Linie gibt den Widerstand bei der im gewählten Punkt herrschenden Spannung, wie in Fig. 11 dargestellt ist.

Es ist $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{i} = r_v$. Wäre der Widerstand bei allen Spannungen derselbe, so würde aus der gezeichneten Kurve eine geneigte Grade entstehen. Um die Absolutwerte der Figur entnehmen zu können, werden die Axen geeicht, d. h. man lässt den Kathodenstrahl einmal die Spannungsaxe mit einer bestimmten gemessenen Spannung überschreiben und sodann die Stromaxe mit einem ebenfalls gemessenen Strom. Es wurden auf diese Art 12 Widerstände in Stabform, sowie 12 Widerstände in Ringform untersucht. Die Nennwerte dieser Widerstände betrugen 5, 50, 500 und 700 Ohm bei den erstern und 5, 50, 200 und 500 Ohm bei den letztern.

Die Dimensionen der Stäbe sind:

Länge = 65 mm, Durchmesser = 30 mm.

Die Dimensionen der Ringe sind:

Länge = 10 mm, Durchmesser = 40/18 mm.

In den Figuren 12 bis 15 sind auszugsweise einige solche Oscillogramme wiedergegeben.

Fig. 12 ist aufgenommen an einem aus einer Anlage nach einer Störung zurückerhaltenen Silit-Stab, Nennwert 700 Ohm. Die zwei Kurven 1 und 2 stellen zwei Aufnahmen dar, bei verschiedenen maximalen Spannungen, die im Zeitabstand einiger Sekunden gemacht sind. Ausserdem wurden zwischen beiden Aufnahmen die Anschlüsse des Ablenkplattenpaars der Spannung vertauscht, um das Spiegelbild der ersten Kurve zu erhalten.

Beide Kurven liegen nicht genau spiegelbildlich, sondern Kurve 2 liegt bereits näher an der Stromaxe. Das heisst, der Widerstand des Stabes ist bei gleichem Strome nach einer Aufnahme kleiner geworden.

Jede aufgezeichnete Kurve ist hin und zurück überschrieben vom Kathodenstrahl, und zwar in der Zeit von ca. $^1/_{50}$ Sekunden, nämlich ca. einer Periode des städtischen Netzes. Hin- und Zurücklauf haben in dieser Figur denselben Wert ergeben, da keine Schleifen sichtbar sind. Zugehörige Spannungs- und Stromwerte und damit Widerstände können aus der Figur entnommen werden.

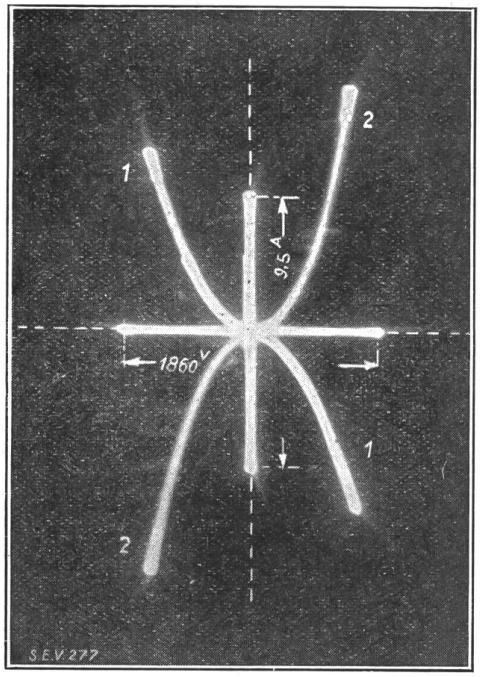

Fig. 12.
Widerstands-Oscillogramme eines Silitstabs mit 700 Ω Nennwert, bei zwei verschiedenen Spannungen mit vertauschtem Anschluss der Spannungs-Ablenkplatten aufgenommen (Kurven 1 und 2), samt zugehörigen Eichwerten der Spannungs- und Stromachse.

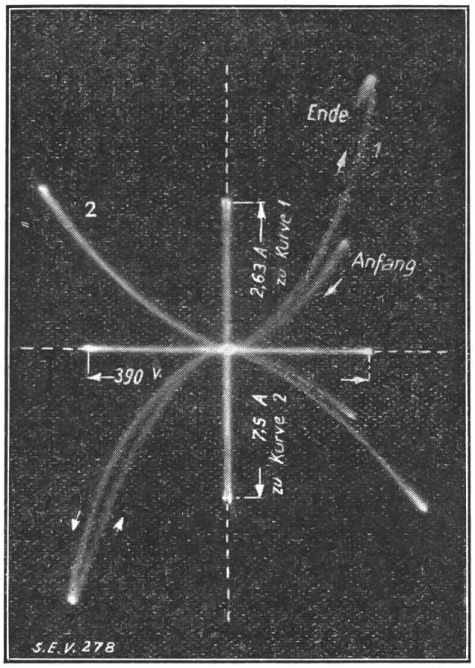

Fig. 13.
Widerstands-Oscillogramme zweier Silitstäbe mit je 50 Ω Nennwert, samt zugehörigen Eichwerten der Spannungs- und Stromachse. Anschluss der Spannungs-Ablenkplatten zwischen den Aufnahmen 1 und 2 vertauscht.

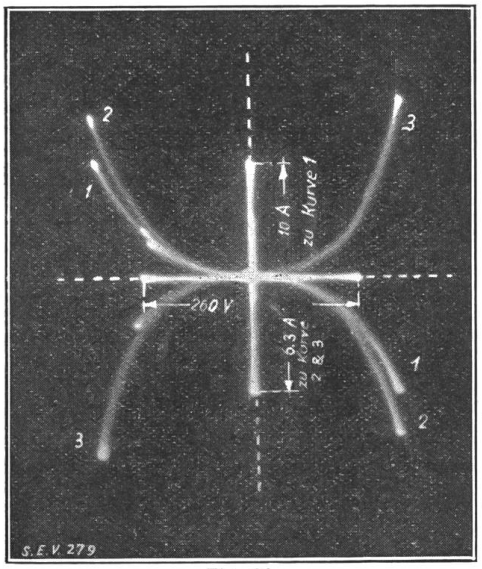

Fig. 14.
Widerstands-Oscillogramme eines Silitringes mit 200 Ω Nennwert, samt Eichwerten der Spannungs- und Stromachse. Kurven 1 bis 3: Drei Aufnahmen bei annähernd derselben Spannung. Für Kurve 3 Anschluss der Spannungs-Ablenkplatten vertauscht.

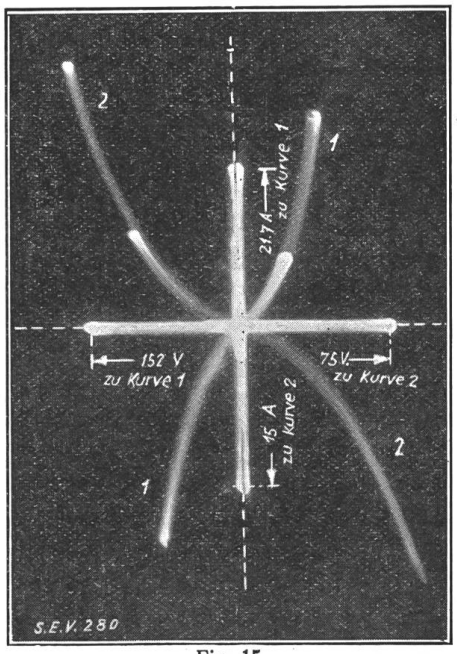

Fig. 15.
Widerstands-Oscillogramme eines Silitringes mit 5 Ω Nennwert, samt Eichwerten der Spannungs- und Stromachse. Anschluss der Spannungs-Ablenkplatten zwischen den Aufnahmen 1 und 2 vertauscht.

Die Erwärmung eines Silit-Stabes im ganzen während dieses Kreislaufes ist klein. Sie beträgt allgemein für die untersuchten Silit-Stäbe ca. 12° C pro kWs und ca. 55° C pro kWs für die Silit-Ringe[8]). Die hineingesteckte Energie betrug, wie sich aus der Fig. 12 ergibt, weniger als $1515 \times 12{,}4 \times \frac{1}{50} = 0{,}376$ kWs, die Erwärmung bleibt also unter 10° C. Dieser Temperaturunterschied hat eine Widerstandsverminderung von höchstens 1 % zur Folge. Da aber eine grössere Widerstandsänderung aufgetreten ist, muss man annehmen, dass einzelne Stellen oder Fäden des Silit-Stabes sich stärker erwärmt haben, dass also die Inhomogenität des Silits Schuld ist an dieser Erscheinung.

Dies hat sich in sehr vielen Fällen bestätigt. Fig. 13 zeigt für den in Kurve 1 dargestellten Silitstab schon beim Durchlaufen je eines Kreislaufes von $^1/_{50}$ Sek. Dauer verschiedene Widerstandswerte bei gleicher Spannung, wie an der Schleifenbildung erkenntlich ist. Solche Aufnahmen wurden in Menge gemacht, die Erscheinung hat sich sehr oft wiederholt. Sie beweist, dass an der Stromleitung im Silit nicht der ganze Stab gleichmässig beteiligt ist, sondern nur einzelne Fäden. Es hat daher keinen Sinn, für kurze Belastungsstösse mit einer gesamten Wärmekapazität des Stabes zu rechnen, da sich in der kurzen Zeit ein Temperaturausgleich nicht vollziehen kann.

Weiter sind in den Figuren 14 und 15 die Widerstands-Oscillogramme von zwei Silit-Ringen wiedergegeben. Es ist deutlich die grössere Spannungsabhängigkeit dieser Ringe erkenntlich. Diese Tatsache ist zuerst von H. Gewecke beschrieben worden. Sie beruht darauf, dass die Spannungsabhängigkeit um so grösser wird, je höher der spez. Widerstand des Materials ist.

Die Bilder zeigen eine recht beträchtliche Krümmung der Kurven, d. h. grosse Spannungsabhängigkeit des Widerstandes. Aus allen Messungen ergeben sich ungefähr folgende Verhältnisse:

Widerstand (Nennwert und Form)	Widerstand bei hoher Spannung / Widerstand bei kleiner Spannung	Tiefste erreichte Widerstandswerte Ohm	Diese Werte sind gemessen bei Spannungen Volt
500 Ohm Stab	$^1/_3$ bis $^1/_5$	120 bis 160	(900 bis 2000) $\sqrt{2}$
50 Ohm Stab	$^2/_3$ bis $^1/_3$	42	(500 bis 850) $\sqrt{2}$
5 Ohm Stab	ca. $^2/_3$	3,3	(130 bis 170) $\sqrt{2}$
500 Ohm Ring	ca. $^1/_{20}$	24	(300 bis 400) $\sqrt{2}$
200 Ohm Ring	$^1/_4$ bis $^1/_8$	20	(220 bis 380) $\sqrt{2}$
50 Ohm Ring	$^1/_2$ bis $^1/_3$	15	(220 bis 370) $\sqrt{2}$
5 Ohm Ring	ca. $^2/_3$	3,1	(90 bis 120) $\sqrt{2}$

Der Grund, warum nicht alle Widerstände bei denselben Spannungen gemessen wurden, oder doch wenigstens jene gleicher Nennwerte, wird sich noch ergeben. Vergleicht man die Widerstandswerte obiger Tabelle mit den Forderungen, die bezüglich Sprungwellenschutz zu stellen sind, so zeigt sich, dass alle Silit-Ringe bei hohen Spannungen genügend tiefe Werte erreichen, um gegen Sprungwellen aus Freileitungen schützen zu können. Für Silit-Stäbe mit 500 Ohm und 50 Ohm Nennwert ist die Spannungsabhängigkeit jedoch zu gering, wenigstens im Bereich der gemessenen Spannungen. Für Sprungwellen aus Kabeln genügen nur die 5 Ohm-Widerstände. Wir werden aber sehen, dass diese Tatsache praktisch oft gar nicht zur Geltung kommt.

[8]) Spezifische Gewichte und Wärmen sind entnommen einem Aufsatz von Dr. Egly über „Silit und seine Verwendung", siehe Helios 1914, Hefte 5 und 6.

c) Die Frequenzabhängigkeit des Widerstandes.

Eine solche wird hie und da zur Erklärung von Störungen vermutet. Sie besteht aber nicht oder jedenfalls in praktisch vernachlässigbarem Mass. Es wurden zur Prüfung dieser Frage 3 Silit-Widerstände mit 700 Ohm, 500 Ohm und 220 Ohm Nennwert bei 300000 Perioden gemessen und die Werte mit den bei Gleichstrom gemessenen verglichen. Der Widerstand bei Hochfrequenz zeigte sich in allen 3 Fällen einige Prozent geringer als bei Gleichstrom. Daraus eine Veränderung zu folgern wäre zu gewagt, da der Widerstandswert der Silit-Stäbe selber nicht genau konstant bleibt. Auch die Spannungsabhängigkeit bleibt im wesentlichen bestehen, soweit dies gemessen werden konnte, d. h. bis zu Spannungen von ca. 50 V eff. Die Resultate decken sich mit denen einer Untersuchung von Alberti und Günther-Schulze [9]).

d) Die in den Netzen vorkommenden Energien von Sprungwellen und die sich daraus ergebende Beanspruchung der Parallelwiderstände an Stromwandlern.

Um das Verhalten der Silit-Widerstände als Parallelwiderstände an Stromwandlern zu erfassen, müssen sie bei Belastungsstössen untersucht werden, die etwa denen gleichkommen, die entstehen, wenn Sprungwellen auf den Wandler auftreffen. Die Dauer dieser Belastung richtet sich nach der Dauer der Sprungwelle, diese wieder nach der Länge der Leitung, auf der sie entsteht, d. h. nach dem Netz. Wir wollen daher die ungefähre Grösse der auftretenden Leistungen, Energien und Beanspruchungsdauern der Stromwandler-Parallelwiderstände durch Sprungwellen ausrechnen. Nehmen wir den in Fig. 16 dargestellten Fall einer Leitung von L km Länge zwischen den beiden Stationen A und B. Es kann sich um eine einfache oder eine Doppelleitung handeln. Der Einfachheit halber nehmen wir die Leitung als nicht verzweigt an. Jede Leitung sei vor den Sammelschienen mit Stromwandlern L versehen.

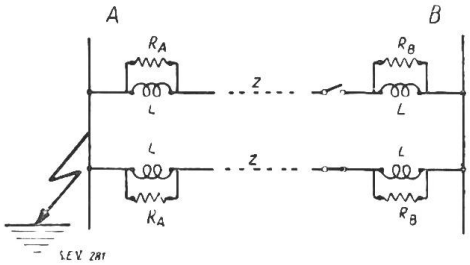

Fig. 16.
Schema zur Rechnung der freiwerdenden Wellenenergien und der Beanspruchung der Stromwandler-Parallelwiderstände bei plötzlichem Erdschluss.

In der Anlage A erfolge ein Erdschluss in irgend einer Phase. *Die Leitungen von A nach B entladen dann sofort die betreffende Phase über die Stromwandlerwiderstände R_A durch Wanderwellen, deren Strom sich bei kleinem Parallelwiderstand des Stromwandlers aus der vorher herrschenden Spannung V der Erdschlussphase gegen Erde und dem Wellenwiderstand Z errechnet zu* $I_0 = \frac{V_0}{Z}$. Der Wellenwiderstand Z bewegt sich in der Gegend von 500 Ohm für Freileitungen und 50 Ohm bei Kabeln. An der bei B offen gezeichneten Leitung wird die einfallende Entladewelle zurückgeworfen unter allmähliger Umladung der Leitung. Sobald die rücklaufende Entladewelle wieder zur Station A gelangt, schickt die Erdschlusstelle eine neue Welle gegen B vor, welche die Leitung wieder entlädt auf Erdpotential. Bei B tritt wieder Reflexion ein unter allmählicher Wiederaufladung der Leitung. Nach Ankunft dieser rücklaufenden Welle ist die Leitung wieder im Anfangszustand, wie sie im Erdschlussmoment war, wenn wir von der Dämpfung absehen. Das Spiel wiederholt sich dann.

Die Widerstände von Leitung und Parallelwiderständen bewirken eine Dämpfung der Entladewellenschwingung. Für die Leitung allein geben das erwähnte Oscillogramm und die Versuche von J. Fallou den zeitlichen Verlauf an. Man erkennt dort die recht kleine Dämpfung durch den Leitungswiderstand und kann darnach die wirksamen Widerstandswerte ausrechnen, wie es Fallou getan hat. Mit Benützung der erwähnten Arbeit lässt sich der Verlauf angenähert rechnen.

[9]) Alberti und Günther-Schulze, Z. f. techn. Physik, 1925, Bd. 6.

Tabelle der bei plötzlichem Erdschluss frei werdenden Wellen-Energien.

Art der Leitung zwischen Station A und B		Freileitung (Wellenwiderstand $Z = 500$ Ohm)			Kabel (Wellenwiderstand $Z = 50$ Ohm)	
Betriebsspannung		50 kV	80 kV	110 kV	30 kV	50 kV
Anfangsleistung einer Erdschluss-Wanderwelle $P_0 = \frac{V_0^2}{Z}$	a)	3333 kW	8533 kW	16133 kW	12000 kW	33300 kW
	b)	10000 kW	25600 kW	48400 kW	36000 kW	100000 kW
Anfangsleistung der Erdschluss-Wanderwelle am Schutzwiderstand R $P_{0R} = \left(\frac{V_0}{Z}\right)^2 R$	a)	[1] 167 kW	[1] 427 kW	[1] 807 kW	[11] 600 kW	[11] 1670 kW
	b)	500 kW	1280 kW	1240 kW	1800 kW	5000 kW
Energieinhalt d. Erdschluß-W'Welle einer Phase der L km langen Leitung $A_0 = \frac{1}{2} V_0^2 C_e = P_0 \frac{T}{2}$	a)	[2] 0,555 kWs	[2] 1,42 kWs	[2] 2,69 kWs	[22] 0,40 kWs	[22] 1,1 kWs
	b)	1,67 kWs	4,27 kWs	8,07 kWs	1,20 kWs	3,33 kWs
Davon stürzt sich auf den Schutzwiderstand folgender Bruchteil und Absolutwert $A_{0R} = \frac{2R}{2R + R_e} A_0$		56 % der Energie A_0 [3]			42 % der Energie A_0 [33]	
	a)	0,31 kWs	0,79 kWs	1,50 kWs	0,166 kWs	0,46 kWs
	b)	0,93 kWs	2,37 kWs	4,50 kWs	0,50 kWs	1,38 kWs
Beim erstmaligen Durchlaufen der Leitung verzehrt die Entladewelle angenähert $A_1 = \left(\frac{V_0}{Z}\right)^2 \left(R + \frac{1}{2} R_e\right) T = \frac{2R + R_e}{Z} A_0$		18 % der Energie A_0			24 % der Energie A_0	
	a)	0,10 kWs	0,256 kWs	0,096 kWs	0,096 kWs	0,264 kWs
	b)	0,30 kWs	0,77 kWs	1,45 kWs	0,29 kWs	0,80 kWs
Dauer des Wellenspiels		Nach $^{12}/_4$ Wellen = 3 Per. = $\frac{1}{250}$ sec ist die Energie auf ca. 10 % ausgeklungen, Spannung und Strom auf ca. 30 %			Nach $^9/_4$ Wellen = $2^1/_4$ Per. = $\frac{1}{1670}$ sec ist die Energie auf ca. 10 % abgeklungen, Spanng. u. Strom auf ca. 30 %	

a) = Bei plötzlichem einphasigen Erdschluss, Sprungwellenspannung = Max. der Phasenspannung.
b) = Bei plötzlichem Doppel-Erdschluss, Sprungwellenspannung = Max. der verketteten Spannung.
[1]) Schutzwiderstand $R = 25$ Ohm angenommen.
[11]) Schutzwiderstand $R = 2{,}5$ Ohm angenommen.
[2]) Leitungslänge $L = 100$ km angenommen, T = Durchlaufzeit der Welle = $\frac{1}{3000}$ sec
[22]) Kabellänge $L = 10$ km angenommen, T = Durchlaufzeit der Welle = $\frac{1}{15000}$ sec
[3]) Leitungswiderstand $R_e = 40$ Ohm angenommen, entsprechend 200 mm² Cu-Querschnitt und 4-fachen Gleichstromwiderstand, geschätzt nach Versuchen von J. Fallou l. c.
[33]) Kabelwiderstand $R_e = 7$ Ohm angenommen, entsprechend 150 mm² Cu-Querschnitt und $5^1/_4$-fachem Gleichstromwiderstand, geschätzt nach Versuchen von J. Fallou l. c.

Dies ist in der folgenden Tabelle geschehen, aus welcher man die ungefähren Leistungen, Energien und Auswirkungsdauern langer Sprungwellen in Freileitungs- und Kabelnetzen ersehen kann. Dabei sind die Werte eingetragen für zwei Fälle, nämlich einmal, sofern der Erdschluss in der Station A bei normalem Betrieb vorkommt (Betriebsfall a) und ferner der andere praktisch wichtige Fall, wo während des Erdschlussbetriebes (Erdschluss irgendwo im Netz) plötzlich ein zweiter Erdschluss in der Station A auftritt (Doppelerdschluss, Betriebsfall b).

Im ersten Fall stellt V_0 höchstens den Maximalwert der Phasenspannung dar, im zweiten Fall hingegen den Maximalwert der verketteten Spannung. Der zweite Fall ist daher in Drehstromnetzen bezüglich der auftretenden Leistungen und Wanderwellen-Energien dreimal gefährlicher.

Zur Tabelle sind folgende Bemerkungen zu machen:

1. In der Rechnung ist angenommen, dass der Erdschluss im Moment des Spannungsmaximums gegen Erde erfolgt. Auf der Leitung ist keine Ueberspannung angenommen, sondern nur die momentane Betriebsspannung. In Wirklichkeit wird bei einem ersten Erdschluss, z. B. infolge Gewitters, an der Ueberschlagsstelle meist höhere Spannung herrschen, jedoch nur auf eine Distanz, die durch die Grösse der Gewitterwolke gegeben ist. Diese übergelagerte Ladung fällt jedoch gegen die übrige normale Betriebsladung der Leitung kaum in Betracht; die Mehrgefährdung ist unwesentlich.

2. Ferner haben wir die Leitung vor der Station B als offen betrachtet. Der Anschluss der Station wirkt sich auf zwei Arten aus: Die schlagfertige Ladung der Erdschlussphase in der Station B summiert sich zu jener auf der Leitung und erhöht dadurch einerseits die Gefahr. Anderseits wird durch das Zuschalten der Station B ein weiterer Parallelwiderstand in Serie mit der Leitung geschaltet, und zwar in der Nähe des Leitungsendes (Reflexionspunktes). Dies hat eine kleine Dämpfungsvergrösserung zur Folge. Klein ist sie, weil der Widerstand fast am Leitungsende liegt, daher nur kurze Zeit den Wanderwellenstrom führt und deshalb weniger dämpft als z. B. der Parallelwiderstand des Stromwandlers in der Station A, der unmittelbar neben der Erdschlusstelle liegt und deshalb ununterbrochen den Wellenstrom führt. Die Wirkung des Zuschaltens der Station B wird also, abgesehen vom kompliziertern Wellenverlauf, in einer Vergrösserung der Periodendauer des Ausgleichsvorganges und zugleich einer kleinen Verminderung der Anzahl Perioden bis zum vollen Abklingen des Vorganges bestehen. Die Beanspruchung des Parallelwiderstandes R_A zum Stromwandler L wird sich infolgedessen nicht wesentlich ändern, sofern die Leitung lang ist.

3. Drittens müssten wir die Wirkung von Abzweigen der Leitung zwischen den Stationen A und B betrachten. Hier ist das gleiche zu sagen wie beim Zuschalten der Station B. Das Wellenspiel wird komplizierter, die schlagfertige Ladung und Energie wird vergrössert entsprechend der Leitungslänge. Die Beanspruchungsdauer wird verlängert infolge der längern Leitungen, die Dämpfung erhöht infolge neu dazukommender, in den Abzweigen liegender Stromwandler mit Parallelwiderständen.

4. Ferner sind in der Tabelle die Reflexionserscheinungen am Parallelwiderstand des Stromwandlers selber vernachlässigt. Denn die angenommenen, für genügende Schutzwirkung erforderlichen Widerstandswerte desselben (nämlich ca. 25 Ohm für Wandler, die an Freileitungen angeschlossen sind und ca. 2,5 Ohm für solche an Kabelnetzen), verhindern nur ca. 2,5 % des Wellenstromes am Weiterfliessen[10]). Da die Rechnung nur über die ungefähre Grösse der Beanspruchung orientieren soll, kann dieser Fehler ohne weiteres vernachlässigt werden.

5. Die Beanspruchung ist immer am grössten für die Parallelwiderstände jener Stromwandler, die in der Nähe der Erdschlusstelle, zwischen dieser und langen Leitungen oder grossen Netzen liegen. Dann muss die ganze Ladung einer Leitung

[10]) R. Rüdenberg, Elektr. Schaltvorgänge, 1923, S. 371.

über den Parallelwiderstand ihres Stromwandlers abfliessen. Die totale schlagfertige Energie der erdgeschlossenen Phase verteilt sich, wie in der Tabelle angegeben ist, auf den ohmschen Widerstand von Leitung und Erde einerseits und den Parallelwiderstand des Wandlers anderseits. Mit den angenommenen Leitungslängen und Widerstandswerten der Parallelwiderstände stürzt sich die gesamte Energie ungefähr zu gleichen Teilen auf Leitung und Parallelwiderstand; im Freileitungsnetz erhält letzterer etwas mehr, im Kabelnetz etwas weniger.

Die beanspruchende Leistung am Parallelwiderstand ist in Kabelnetzen rund zehnmal grösser als in Freileitungsnetzen gleicher Spannung. Die den Parallelwiderstand beanspruchende Energie ist in dem angenommenen Fall eines 10 km langen Kabels nur wenig grösser als bei der 100 km langen Freileitung gleicher Spannung, infolge der grösseren Dämpfung und der kleineren Länge des Kabels gegenüber der Freileitung, womit man praktisch zu rechnen hat.

Dabei sind stets die für genügende Schutzwirkung der Parallelwiderstände erforderlichen Widerstandswerte von ca. 25 Ohm für Stromwandler an Freileitungen und ca. 2,5 Ohm für solche an Kabelnetzen in die Rechnung eingeführt. Für Widerstände, die auch bei der während des Auftreffens der Sprungwelle herrschenden hohen Spannung zwischen den Primärklemmen des Wandlers noch höheren Widerstand besitzen, erhöhen sich die Leistungen und Energien, die erstere schlucken müssten, noch entsprechend.

Die geschilderte Beanspruchung kommt jedesmal vor, wenn plötzlich ein Erdschluss stattfindet. Ist das betreffende Netz nicht gegen die Entstehung des aussetzenden Erdschlusses geschützt, so kann sich der Vorgang jede hunderstel Sekunde wiederholen und zwar mit steigender Grösse der Spannungen und Ströme, entsprechend dem Aufschaukeln der Spannung der Erdschlussphase gegen Erde. In solchen Netzen vervielfachen sich beanspruchende Leistung und Dauer.

Damit ist die ungefähre Grösse und Dauer der praktisch vorkommenden Beanspruchungen von Parallelwiderständen an Stromwandlern festgestellt und wir können uns nun den Versuchsanordnungen und Versuchen zuwenden, die zeigen sollen, wie sich die Silit- und silitähnlichen Widerstände bei solchen kurzen Belastungsstössen verhalten.

e) Ein Energie-Ersatzschema für die Beanspruchung der Parallelwiderstände.

Der nächstliegende Weg wäre derjenige, die Leitung durch einen anderen Energielieferanten zu ersetzen, welcher in Serie mit dem Schutzwiderstand diesen in jedem Moment der Entladung mit gleicher Leistung beansprucht, wie es die Leitung tut.

Für nicht spannungsabhängige Widerstände könnte dies in guter Annäherung dadurch geschehen, dass an Stelle der Leitung eine geladene Kondensatorbatterie C_e geschaltet wird nach Schema Fig. 17, dem Energie-Ersatzschema für Fig. 16. Durch passende Wahl der Zeitkonstanten $T_e = C_e R$ des Kreises kann das zeitliche Abklingen der Beanspruchung gleich demjenigen bei der Leitung gewählt werden, wenn man vom stufenweisen Absinken von Spannung und Strom bei der Leitung absieht und dafür stetigen Rückgang zulässt. Ferner ist dabei die Richtung des den Widerstand durchströmenden Stromes ausser Acht gelassen, d. h. statt des schwingenden Stromverlaufs ist ein aperiodischer angenommen, was für die Leistung gleichgültig ist. Die Stossenergie wird dadurch gleich gemacht, dass man den Kondensator C_e auf die Anfangsspannung V_{0R} aufladet. Durch Einlegen des Schalters in Fig. 17 entladet sich C_e über den Widerstand R und beansprucht diesen dann in gleichwertiger Weise, wie es die Leitung bei einem plötzlichen Erdschluss tut.

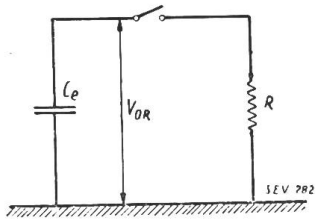

Fig. 17.
Energie-Ersatzschema für die Beanspruchung des Parallelwiderstandes an Stromwandlern nach Fig. 16.

Für spannungsabhängige Widerstände (Silit) könnte man sich dadurch behelfen, dass dem Silitwiderstand R grössere konstante Widerstände vorgeschaltet werden, so dass der Gesamtwiderstand als konstant gelten kann. Damit hätte man wieder, abgesehen vom treppenförmigen Absinken der Spannungen und Ströme bei der Leitung und von der Richtung des Stromes durch den Widerstand, ein gutes Ersatzbild.

Durch Rechnung überzeugt man sich aber bald, dass die für einen solchen Versuch nötigen Kapazitäten eine Grösse haben müssten, die wohl wenigen Leuten für Versuche zur Verfügung steht. Nur um einen anschaulichen Begriff davon zu geben, welch enorme Leistung und „Stossenergie" einem konstant gedachten Silit-Widerstand von 25 resp. 2,5 Ohm in einem 100 km Freileitungs- oder 10 km langem Kabelnetz bei plötzlichem Erdschluss einer Phase nach Fig. 16 aufgedrückt wird, ist folgende Tabelle gerechnet worden. Sie soll die Tabelle Seite 672 in dieser Hinsicht ergänzen.

Tabelle zur Veranschaulichung der Beanspruchung von Parallelwiderständen an Stromwandlern nach Ersatz-Schema Fig. 17.

Netzart	Freileitung (Wellenwiderstand Z=500 Ohm)			Kabel (Wellenwiderstand Z=50 Ohm)	
Betriebsspannung	50 kV	80 kV	110 kV	30 kV	50 kV
Am Parallelwiderstand auftretende Anfangsspannung $V_{0R} = \sqrt{P_{0R} \cdot R}$	a) [1] 2040 V max.	[1] 3260 V max.	[1] 4500 V max.	[11] 1225 V max.	[11] 2040 V max.
	b) 3530 V max.	5650 V max.	7800 V max.	2120 V max.	3530 V max.
Anfangsstrom $I_0 = \frac{V_{0R}}{R} = \frac{V_0}{Z}$	a) 81,5 A max.	130 A max.	180 A max.	490 A max.	815 A max.
	b) 141 A max.	225 A max.	312 A max.	850 A max.	1410 A max.
Dämpfungs-Zeitkonstante für Spannungen u. Ströme $T_D = \frac{2L}{2R + R_e}$ [2]	0,0037 s	0,0037 s	0,0037 s	0,00055 s	0,00055 s
	Spannungen und Ströme sind nach $3T_D = 0{,}011$ s auf 5% abgeklungen			Spannungen und Ströme sind nach $3T_D = 0{,}00165$ s auf 5% abgeklungen	
Ersatzkapazität C_e für annähernd gleiche Beanspruchung des Parallelwiderstandes wie durch die Erdschlusswellen der Leitg. Z [2] $C_e = \frac{1}{T_D \cdot R}$	150 μF	150 μF	150 μF	220 μF	220 μF
Diese Ersatzkapazität wird veranschaulicht durch einen Versuchs-Kondensator, der bei f=50 folgende Blindleistung aufnimmt $P_c = \left(\frac{V_{0R}}{\sqrt{2}}\right)^2 \omega C_e$	a) 98 kVA	250 kVA	480 kVA	52 kVA	144 kVA
	b) 294 kVA	755 kVA	1440 kVA	156 kVA	432 kVA

[1] Parallelwiderstand R = 25 Ohm.
[11] Parallelwiderstand R = 2,5 Ohm.
[2] Leitungsdaten siehe Tabelle Seite 672.

Wer jemals Gelegenheit hatte, Kondensatoren für solche Leistungen und Spannungen zu sehen und den „Schuss" bei deren Entladung über einen kleinen Widerstand zu beobachten (der 300 kVA-Kondensator würde z. B. einem Helsby-Condenser von ca. 2 m Höhe, 1,5 m Länge und 0,9 m Breite entsprechen), der hat ein anschauliches Bild von den sehr grossen Anforderungen, die an die Parallelwiderstände an Stromwandlern in grossen Hochspannungsnetzen gestellt werden.

Aus der Rechnung ist auch ohne weiteres zu ersehen, dass es in den wenigsten Laboratorien möglich ist, Versuche mit so grossen Energiespeichern zu machen. Wir werden darauf zurückkommen.

Für unsere Versuche des Verhaltens der Silit-Widerstände bei Stossbelastungen musste daher eine andere Art der Beanspruchung gewählt werden. Als einfachster Weg bietet sich ein Wechselstromnetz mit sinus-förmiger Spannung.

f) Beobachtung des Verhaltens der Silit-Widerstände bei kurzzeitigen Belastungsstössen, bei zeitlich sinusförmigem Verlauf der angelegten Spannung.

Für die Versuche wurde die Dauer der Beanspruchung der Widerstände auf $^1/_{50}$ sec, d. h. auf eine Periode des städtischen Netzes festgesetzt. Dies ist der 5fache Betrag jener Zeit, während der an einer 100 km langen Freileitung Spannung und Strom auf ca. 30 % ihres Anfangswertes absinken. Der Grund zu dieser Wahl liegt darin, dass erstens längere Leitungsnetze als 100 km, die sich über einen Stromwandler-Parallelwiderstand entladen, in der Praxis vorkommen; zweitens weil infolge der Spannungsabhängigkeit der Silit-Widerstände die grosse, von ihm aufgenommene Leistung (bei sinus-förmigem Spannungsverlauf) nur in der Gegend des Spannungsmaximums vorhanden ist, nicht während der ganzen Periode. Drittens sind dadurch leicht und überall reproduzierbare Versuchsbedingungen geschaffen.

Die Belastungsstösse wurden alle derart erzeugt, dass mit Hilfe einer 130 kVA-Gruppe, eines Transformators 100 kVA und eines Synchronschalters der Widerstand während einer Periode ($^1/_{50}$ sec) eingeschaltet wurde, und zwar ungefähr zwischen den Nullwerten der Spannung. Bei diesen Stössen wurden die bereits gezeigten Oscillogramme aufgenommen und dabei zeigte sich nun, *dass die Belastungsfähigkeit der Silit-Widerstände viel geringer ist, als sich aus der Rechnung der Wärmekapazität des ganzen Stabes ergeben würde.* Wurde an einen Silit-Stab eine Spannung von einigen hundert bis ca. 2000 V eff. während $^1/_{50}$ sec angelegt (je nach Widerstandswert verschieden), so konnte in der Regel ein lebhaftes Sprühen des Widerstandes beobachtet werden, das in vielen Fällen in eine starke Feuererscheinung und Kurzschluss überging. Dieses Sprühen tritt zunächst bei tiefer Spannung mehr an den Rändern des Widerstandes auf, wo die Klemmstücke sitzen. Durch Versilbern oder Verkupfern der Widerstandsenden konnte daran nichts verbessert werden. Die Feuererscheinung tritt dann meistens am Rand des Belages auf. In Fig. 18 ist versucht, das Bild eines relativ homogenen, vorher bei ca. 140 V zum Ueberschlag führenden Silit-Ringes mit 5 Ohm Widerstand festzuhalten, der bei ca. 100 V eff. viele Male hintereinander je $^1/_{50}$ sec eingeschaltet wurde. Wird die Spannung weiter gesteigert, so führt das Feuern meist zum Ueberschlag des Widerstandes und bewirkt Kurzschluss. Ein solches Bild zeigt Fig. 19, die an einem andern Silit-Ring mit 200 Ohm Nennwert aufgenommen wurde bei ca. 700 V eff. Der Widerstand wurde ca. fünfmal hintereinander eingeschaltet, in Abständen von je ca. 15 sec. Von Auge war bei der letzten Schaltung ein starkes, strahlenförmiges Licht zu sehen. Auf dem Bild ist leider nur dessen Herd ersichtlich, aber nicht die ganze Grösse der Lichterscheinung. Es ist anzunehmen, dass die von Auge sichtbaren Strahlen aus weggeschleuderten glühenden Silit-Teilchen bestehen, die zu rasch wegfliegen, um die Photoplatte zu belichten. Der Widerstand war nach der Aufnahme höchstens lauwarm.

Dieselbe Feuererscheinung ist bei den Silit-Stäben auch zu sehen, nur braucht es hier mehr Spannung, um sie hervorzurufen. Die Fig. 20 und 21 geben zwei Beispiele. Jeder der beiden dargestellten Silit-Stäbe hat den Nennwiderstand 500 Ohm.

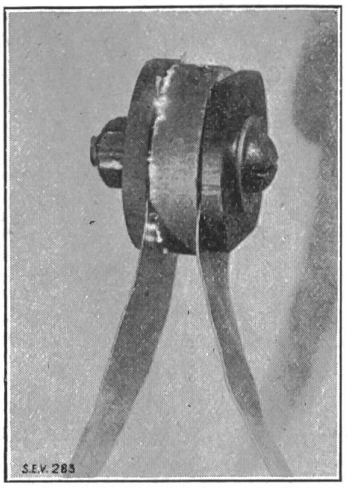

Fig. 18.
Photo eines Silitrings mit 5 Ω Nennwert, während der viele Male hintereinander je $^1/_{50}$ sec auf ca. 100 V eingeschaltet wurde.

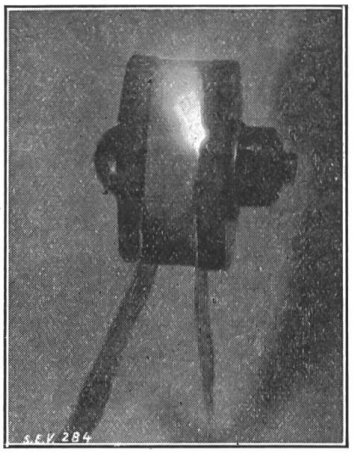

Fig. 19.
Photo eines Silitrings mit 200 Ω Nennwert, während der 5 Mal je $^1/_{50}$ sec auf 700 V eingeschaltet wurde in Abständen von je ca. 15 sec.

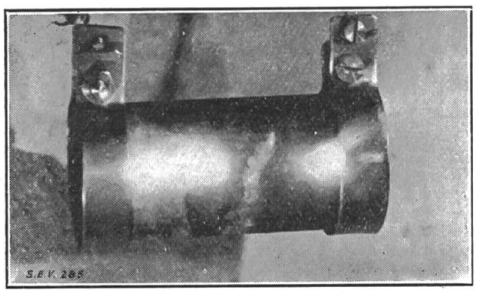

Fig. 20.
Photo eines Silitstabes mit 500 Ω Nennwert, während der $^1/_{50}$ sec auf 1300 V eingeschaltet wurde.

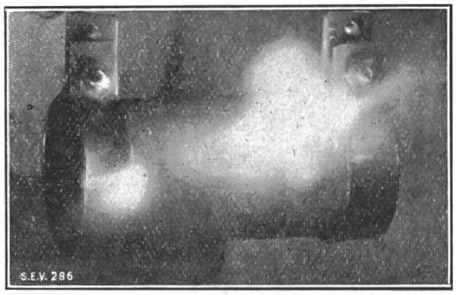

Fig. 21.
Photo eines andern Silitstabes mit 500 Ω Nennwert, während er $^1/_{50}$ sec auf 1300 V eingeschaltet wurde.

Die Bilder sind bei 1300 V eff. aufgenommen. Einschaltung je einmal $^1/_{50}$ sec. Es wurden auch Oscillogramme während eines Ueberschlages aufgenommen. Die starke Feuererscheinung könnte bei jedem Silit-Widerstand beobachtet werden. Es ist aus diesem Grund nicht möglich, die Widerstände bei höheren Spannungen zu benützen als den in der Tabelle über die Spannungsabhängigkeit angegebenen, bei Belastungsdauern von $^1/_{50}$ sec.

Rechnet man die Energiemengen aus, bei welchen die Feuererscheinung auftritt, so gelangt man zu Werten von ca.

5 kW während $^1/_{50}$ sec oder = 0,1 kWs für die Silit-Ringe
15 kW während $^1/_{50}$ sec oder = 0,3 kWs für die Silit-Stäbe

als Grenze dessen, was die Widerstände ohne Feuererscheinung ertragen. Für Quarzilitwiderstände wurde die Belastungsfähigkeit angegeben zu 60 W/cm³ während einer Sekunde [11]).

Dies ergäbe als höchstzulässige Belastung etwa:

0,6 kW während einer sec oder 0,6 kWs für Silit-Ringe,
2,75 kW während einer sec oder 2,75 kWs für Silit-Stäbe.

[11]) Bulletin S. E. V., 1924, S. 517. Eigenschaften und Anwendung des Quarzilit-Materials.

Aus beiden Zahlenreihen ersieht man wieder, dass die Belastungsfähigkeit in kW für kurze Beanspruchungszeit lange nicht in dem Mass zunimmt, wie die Belastungsdauer abnimmt. Die zulässige Energieaufnahme in kWs (Wärmekapazität) ist keine konstante, sie sinkt wesentlich bei kurzer Belastungsdauer. *Vergleicht man ferner diese Werte mit den Belastungsstössen, welche die Widerstände im Moment eines plötzlichen Erdschlusses aufnehmen sollten, so ergibt sich, dass die Widerstände in 50 bis 110 kV-Anlagen 10 bis 100 mal grössere Leistungen störungsfrei absorbieren müssten als sie es in den Versuchen taten. Die vom Widerstand aufzunehmenden Energien in kWs sind in vielen Fällen wesentlich grösser als der ohne Feuererscheinung zulässig gefundene Betrag, trotzdem die Belastungsdauern im Netz eher kürzer sind als im Versuch und daher der gleiche Energiebetrag noch schwieriger aufgenommen würde.* In grossen Hochspannungskabelnetzen kann das Verhältnis noch schlimmer sein. Bei aussetzendem Erdschluss (der zwar aus modernen Hochspannungsanlagen verschwunden sein dürfte) wiederholt sich das Schauspiel jede hundertstel sec mit steigender Amplitude, entsprechend dem Aufschaukeln der Spannung gegen Erde. Der Silit-Widerstand ist in diesem Fall ausserordentlich stark überbeansprucht; ein Beitrag zur Erklärung der Furcht der Betriebe vor aussetzenden Erdschlüssen, bei denen es „in allen Ecken und Enden der Anlage feuert".

Dass eine Feuererscheinung von der intensiven Art, wie sie an Silit-Widerständen auftritt, in Hochspannungsanlagen unzulässig ist, steht wohl ausser Frage. Die in den heissen Gasen vorhandenen Ionen liefern die Geschosse, die den Ueberschlag von den Stromwandlerklemmen nach allen Seiten ermöglichen. Die Verhinderung solcher Feuererscheinungen ist ja gerade der Zweck der Parallelwiderstände. Die geschilderten Beobachtungen an Silit-Widerständen erklären eine Reihe von Störungen an Stromwandlern. Die auftretende Flamme erklärt auch die hie und da unbegreiflich grosse Schlagweite solcher Ueberschläge. (In einem 50 kV-Betrieb in der Nähe Zürichs ist während eines Gewitters ein Ueberschlag vom Stromwandler, der kurz hinter der Gebäudeeinführung angeordnet war, gegen die Mauer aufgetreten über eine Distanz von ca. 2 Meter.)

Es ist wertvoll, dass gerade an einem aus dem Betrieb zur Untersuchung erhaltenen Stromwandler mehrere Brandstellen am Porzellan und am Deckel sichtbar sind und zwar liegen sie alle direkt unter der Stelle, wo der Silit-Widerstand angebracht ist, deuten also geradezu auf den beschriebenen Vorgang hin.

Zu erwähnen bleibt die beträchtliche Ungleichheit im Verhalten von Silit-Widerständen mit demselben Nennwert [12]), sowie deren stete Veränderung, die bei den Versuchen beobachtet wurde:

Ein Silit-Stab mit 50 Ohm Nennwiderstand zeigte bei der Messung mit 10 V Gleichstrom einen Widerstand von 62,5, 250, 625 oder 750 Ohm, je nachdem die Klemmstücke aus Messing, wie sie in den Fig. 20 und 21 ersichtlich sind, zur Hälfte über den Rand hinausragend, oder gerade bündig mit dem Rand, oder 1 bis 2 mm weiter innen angepresst wurden, trotzdem die Oberfläche des Stabes an den Enden schwach versilbert war. Ein anderer Silit-Stab mit 50 Ohm Nennwiderstand zeigte nach einigen Belastungsstössen von je $^1/_{50}$ sec Dauer und ca. 600 V eff. Spannung eine Zunahme des Widerstandes auf das ca. 3,5fache. Zwei Silit-Stäbe von 500 Ohm Nennwiderstand zeigten nach einigen Belastungsstössen mit Spannungen bis zu ca. 2000 V eff. und dabei entstehenden Ueberschlägen rund den 6fachen Widerstand. Andere Widerstände wieder änderten ihre Werte nur ganz unbeträchtlich, wenn sie stossartig belastet wurden. Im allgemeinen steigt jedoch der Widerstand mit der Zeit infolge dieser Belastungsstösse. Ein Teil der Widerstände sieht nach Ueberschlägen wie wurmstichig aus. Andern sieht man kaum etwas an.

Alle Beobachtungen sind dadurch erklärlich, dass an der Stromleitung im Silit hauptsächlich einzelne leitende Fäden beteiligt sind, die sich aus relativ gut leitenden Teilchen bilden, mit dazwischenliegenden kleinen Lichtbogen. Solche Fäden werden

[12]) Siehe auch Alberti & Günther-Schulze l. c.

bei einem kurzen Belastungsstoss sofort heiss und bilden dann die Sprüh- und Feuersgefahr. Wird mehrmals belastet, so können solche Brücken ausgebrannt werden und nachher vielfachen Widerstand bieten.

Die Ursache, warum in früheren Laboratoriumsversuchen Feuererscheinungen am Silit nicht beobachtet wurden, ist wohl der viel zu kleinen Energie zuzuschreiben, die dort dem Silit zugemutet wurde. H. Gewecke [13]) benutzte eine Versuchsleitung von nur 100 m Länge mit relativ hohem Wellenwiderstand (aus den Daten gerechnet zu ca. 770 Ohm). Die Grösse der zusätzlichen Kapazität, die Energie nachzuliefern hatte, ist nicht angegeben. Jedenfalls ist sie viel zu klein, um die Energie zu liefern, die aus einer langen Hochspannungsleitung auf den Widerstand einstürmt [14]).

Auch dieses Beispiel zeigt, wie vorsichtig man bei der Uebertragung der Resultate von Laboratoriumsversuchen auf das Verhalten in grossen Netzen sein muss.

g) Abhilfe der Stromwandlerstörungen.

Die an den durch Widerstände überbrückten Stromwandlern auftretenden Störungen haben zwei Ursachen: Erstens zum Teil zu hohe Werte der Parallelwiderstände und zweitens zu geringe Belastungsfähigkeit derselben, wobei speziell die heutigen Silit- und ähnlichen Produkte untersucht wurden. Entscheidend ist die eine oder andere Ursache, je nach der Betriebsspannung, Art und Ausdehnung des Netzes, in dem die Wandler eingebaut sind.

In kurzen Netzen mit mässiger Hochspannung genügen im allgemeinen die Silit-Widerstände den gestellten Anforderungen. In grossen Hoch- und Höchstspannungsnetzen hingegen ist sowohl die Spannungsabhängigkeit der verwendeten Silit-Widerstände zum Teil zu klein, d. h. die bei hoher Spannung vorhandenen Widerstandswerte zu hoch (speziell bei den 500 Ohm-Silit-Stäben), als auch vor allem die Belastungsfähigkeit dieser Widerstände ungenügend.

Die Grenzen obiger Betriebsspannungen liegen schätzungsweise bei 15 kV für Freileitungs- und 10 kV für Kabelnetze, für die 500 Ohm-Silit-Stäbe noch eher tiefer. Der genaue Wert ist nur durch Versuche in Anlagen zu bestimmen.

Die Abhilfe der Störungen verlangt entweder eine wesentliche Verbesserung der für Stromwandlerzwecke benützten Silit-Produkte und eine Prüfung derselben auf Stoss-Belastungsfähigkeit. Oder dann eine andere Art spannungsabhängiger Widerstände. Der Verbesserung der Silit-Widerstände stehen prinzipielle Schwierigkeiten im Wege: Um nicht die Spannungsabhängigkeit des Widerstandswertes zu opfern, darf der Silit-Stab- oder -Ring nicht verlängert werden. Es bleibt lediglich ein grösserer Querschnitt als Ausweg. Ob diese Abhilfe aber nützt, ist deshalb fraglich, weil die Versuche ergeben, dass infolge der Inhomogenität nicht der ganze Querschnitt gleichmässig, sondern hauptsächlich einige relativ gut leitende Fäden den Strom zu leiten haben. Die Zunahme der Belastungsfähigkeit ist dadurch in Frage gestellt.

Eine Serie-Funkenstrecke zum Schutzwiderstand, wie dies einzelne Fabriken ausführen, kann der Schwierigkeit zum Teil begegnen, da sie die Spannungsabhängigkeit des Widerstandes in idealem Mass verstärkt, nicht aber dessen Belastungsfähigkeit. Deshalb haben sich in der Praxis auch hier Schwierigkeiten gezeigt. Abgesehen vom Anbrennen und Zusammenschmoren dieser Funkenstrecke durch den beim Funktionieren auftretenden Lichtbogen ist dieser selbst eine nicht erwünschte Erscheinung an den Stromwandlerklemmen. Diese Konstruktion löst den Kompromiss zwischen Messgenauigkeit und Schutzwert zu Gunsten der Messgenauigkeit.

Eine Parallelfunkenstrecke zum Schutzwiderstand, d. h. zur Primärwicklung des Stromwandlers, ist betriebstechnisch die bessere Lösung. Sie löst den Kompromiss zwischen Messgenauigkeit und Schutzwert in Richtung einer Verbesserung des Schutz-

[13]) H. Gewecke 1, c.

[14]) siehe Seite 672.

wertes, indem sie die Spannung an den Wandlerklemmen und am Widerstand nach oben begrenzt. Die Konstruktion der Bernischen Kraftwerke ist in dieser Hinsicht bemerkenswert.

Bestehen bleibt der Nachteil des offenen Feuers an den Wandlerklemmen bei starker Beanspruchung und die damit verbundene Erd- und Kurzschlussgefahr. Alle diese bisherigen „Schutzmittel" erfüllen den Zweck der Verhinderung von Ueberschlägen zwischen den Stromwandler-Primärklemmen im kritischen Moment oft nicht. Eine gewöhnliche Parallelfunkenstrecke ist diesen Anordnungen etwa gleichwertig.

Es gibt einige Konstruktionen (Freiluftwandler und solche für sehr hohe Spannungen), die metallisch eingekapselte Parallelwiderstände aufweisen. Damit kann die Ueberschlagsgefahr infolge des offenen Feuers vermindert werden, sofern nämlich die Feuererscheinung nicht so stark wird, dass die Flamme durch die Oeffnungen der Kapsel herausdringt. Dafür erschwert aber diese Anordnung die Betriebskontrolle der Parallelwiderstände, da zu deren Nachsicht das Ausserspannungsetzen des Wandlers nötig wird. Solange aber noch öfters Defekte an den Parallelwiderständen auftreten, sollte diese Kontrolle leicht ausgeführt werden können.

Zur Ueberbrückung der Stromwandler für Hoch- und Höchstspannungsnetze scheinen mir nach den durchgeführten Versuchen und den Erfahrungen der Betriebe luftdicht abgeschlossene Funkenstrecken bei vermindertem Druck (z. B. Edelgasröhren) geeignet zu sein. Vielleicht bietet sich Gelegenheit, später über Versuche mit solchen zu berichten.

VI. Anhang.

Beitrag zum Spulenproblem für Stromwandler.

a) Uebersicht über den heutigen Stand des Spulenproblems.

Die rasche Entwicklung der Hochspannungsanlagen einerseits und die rasche Verbreitung der drahtlosen Telegraphie und Telephonie anderseits haben in den vergangenen 10 bis 15 Jahren das Interesse für das Verhalten von Spulen bei rasch verlaufenden Vorgängen stark gesteigert. In der Hochspannungstechnik waren es Ueberspannungs-Erscheinungen, speziell an Transformator- und andern Wicklungen, die Erklärung und Abhilfe verlangten. In der drahtlosen Uebertragung erhielt die Spule durch die Entdeckung und Nutzbarmachung der Elektronenröhren erneute Bedeutung und Aufmerksamkeit. Es ist daher in den Jahren seit ca. 1912 eine Reihe wertvoller Arbeiten erschienen, die das Verhalten der Spulen und Wicklungen bei hochfrequenten Schwingungen und auftreffenden Wanderwellen zu ergründen suchten. Je nach der Art, wie die schwierige Aufgabe angepackt wurde, entstanden auch abweichende Lösungen, auf die kurz eingegangen werden soll.

Durch direkte Integration der Maxwell'schen Feldgleichungen haben Lenz[a]) [15]) & Szász[b]) für eine Einlage-Spule mit vielen Windungen die Höhe der Eigenfrequenzen, sowie die dabei vorhandene Spannungsverteilung über die Spule berechnet. Die sehr wertvolle, mehr physikalische Arbeit kann durch die damals vorliegenden Versuche von Drude[c]) und Seibt[d]), sowie durch die spätern von Gothe[e]) und Ridder[f]) als gesichert gelten. Von der technischen Seite her wurden die Ueberspannungsfragen an technischen Spulen zur Diskussion gestellt und behandelt in der Folge von Rüdenberg[g]), Wagner[h]) und Böhm[i]). Rüdenberg[g]) packt die Spule an als Leitung mit veränderlichem Wellenwiderstand. Dabei spricht er zum ersten Mal von einer kritischen Frequenz in dem Sinn, dass Wellen mit kleinerer Frequenz als die kritische in die Wicklung einziehen, Wellen höherer Frequenz aber am Wicklungs-Anfang reflektiert werden und daher die Spule nicht passieren könnten. Wagner[h]) fasst die Spule auf als Kettenleiter, dessen Theorie er bereits 1915 aufgestellt hat. Jedes Glied der Kette wird durch eine Windung der Spule dargestellt gemäss dem Spulenschema der Fig. 22. Wesentlicher Unterschied der Spule gegenüber der homogenen Leitung ist darnach die Kapazität zwischen benachbarten Windungen C_w. Nach dieser Auffassung kann die Spule eine Reihe von Eigenschwingungen ausführen, die sich aber

[15]) Die Literaturangaben a) bis m) sind am Schlusse des Aufsatzes zusammengestellt.

sämtlich unterhalb einer „kritischen Frequenz" befinden, welch letztere sich darstellt als Stromresonanz einer Windung, deren magnetisches Feld sich aus den Beiträgen aller Windungen ergibt. Ueber dieser Frequenz laufen die Wechselströme nicht mehr längs dem Draht, sondern überwiegend quer zum Draht, über Windungs- und Erdkapazität analog wie z. B. bei einem Kettenisolator.

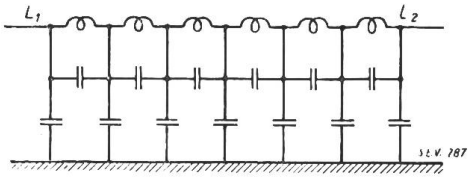

Fig. 22.
Spulen-Ersatzschema nach K. W. Wagner (Kettenleiter).

Die Bedeutung der kritischen Frequenz als obere Grenze aller möglichen Eigenfrequenzen musste später fallen gelassen werden, da das Ersatzschema zur Entscheidung dieser Frage nicht genügt.

Böhm[i]) untersucht in einer wertvollen Arbeit das Verhalten von Transformatorwicklungen rechnerisch und experimentell, indem er analog wie Wagner die Windungskapazität als wesentlichen Unterschied gegenüber der homogenen Leitung einführt und ferner die Stromdifferenz benachbarter Windungen berücksichtigt. Er findet für die Wicklung ebenfalls eine „kritische Frequenz", aber lediglich in dem Sinn, dass sie zwei Gebiete mit grundsätzlich verschiedenem Verhalten der Wicklung gegen die angelegte Wechselspannung trennt. Die in die Wicklung eindringende Spannung soll sich stets aus zwei Teilen zusammensetzen. Davon läuft der erste Teil über die Wicklung hin wie über eine homogene Leitung. Dieser Teil überwiegt bei Frequenzen unter der kritischen. Der zweite Teil hingegen schiebt sich quer über die Wicklung hin, nicht längs des Drahtes, sondern längs der Windungskapazität und klingt vom Wicklungseingang gegen das Ende exponentiell ab. Für diesen zweiten Teil wäre es gleichgültig, wenn die Windungen unter sich gar nicht metallisch verbunden wären; er überwiegt bei Frequenzen über der kritischen. Die kritische Frequenz stellt sich wie bei Wagner als Stromresonanz der Wicklung dar. Bei ihr soll überdies die Spannung zwischen zwei benachbarten Windungen am Wicklungsanfang ein Maximum erreichen, welches wesentlich höher liegt als dasjenige, das bei Auftreffen einer langen Sprungwelle vorkommt.

Eine spätere Arbeit Böhms behandelt die wechselstrom-gespeiste Spule mit vielen Windungen auf Grund eines Mehrleitersystems, das sich durch Aufschneiden der Spule längs einer Mantellinie und Ausbreiten in eine Ebene ergibt. Die kritische Frequenz als Grenzpunkt zweier verschiedener Spannungsverteilungen über die Wicklung wird aufrecht erhalten mit etwas modifiziertem Betrag. Eine nach oben unbegrenzte Anzahl von Eigenschwingungen wird berechnet und in der mittlerweile von Rogowski eingeführten Weise in Eigenfrequenzen 1. und 2. Art unterteilt, wobei sich die Spule entweder in Strom- oder in Spannungsresonanz befindet. Kritische Frequenz und Eigenfrequenzen haben nichts miteinander zu tun. In einer nach der ersten Arbeit Böhms erschienenen Arbeit von Wagner vergleicht dieser die Resultate seiner erweiterten Rechnung mit derjenigen von Böhm und fasst nochmals die wichtigsten Ergebnisse der Arbeiten Rüdenberg, Böhm und Wagner zusammen. Seit 1918 hat sich dann Rogowski[k]) mit einer überaus fruchtbaren Auffassung an der Lösung des Spulenproblems beteiligt. Seine Vereinfachung besteht in der Betrachtung einer Spule aus zunächst zwei Windungen in Form eines langen Rechtecks, wie in Fig. 23 angedeutet. Für diese Spule lässt sich das Verhalten in durchsichtiger Weise berechnen, und zwar nicht nur für stationäre Schwingungen, sondern auch für den Einschaltvorgang. Es ist Rogowski und seinen Mitarbeitern bereits gelungen, mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen die Ergebnisse dieser Theorie für den Einschaltvorgang einer Spule zum Teil nachzuprüfen. Die veröffentlichten Oscillogramme stehen im Einklang mit der

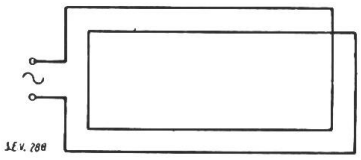

Fig. 23.
Zweiwindungsspule nach Rogowski.

Rechnung [16]). Die sich ergebenden Eigenfrequenzen dieser vereinfachten 2-Windungsspule stimmen mit denjenigen, die sich nach der Rechnung Lenz-Szász ergeben, überein und erweisen sich als eine abwechselnde Folge von Strom- und Spannungsresonanz. Erstere werden als Eigenfrequenzen erster Art, die letzteren als Eigenfrequenzen zweiter Art bezeichnet. Das aus dieser Betrachtung sich ergebende Verhältnis von Strom zu Spannung in der Spule aus wenig Windungen bei verschiedenen Frequenzen wird dargestellt durch eine den Arbeiten Rogowskis entnommene Fig. 24 (aus A.f.E., Bd. 7, S. 31, Fig. 12). Zeichnen wir an Stelle der Werte von

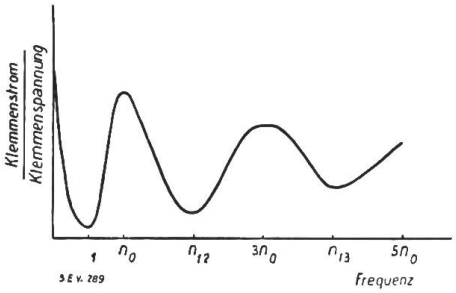

Fig. 24.
Verhältnis von Klemmenstrom zu Klemmenspannung in Funktion der Frequenz für die Spule nach Rogowski.

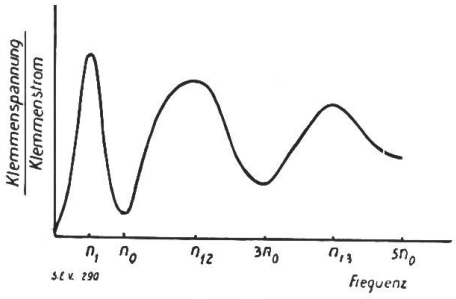

Fig. 25.
Verhältnis von Klemmenspannung zu Klemmenstrom (Impedanz) in Funktion der Frequenz für die Spule nach Rogowski.

Strom und Spannung den reziproken Wert, also die Spulenimpedanz, so müsste der Verlauf qualitativ durch Fig. 25 wiedergegeben werden. In der bereits erwähnten Arbeit von Ridder findet sich ganz am Schluss eine solche Kurve, die an einer einlagigen Versuchsspule aufgenommen wurde (A.f.E., Bd. 10, 1922, S. 369). Die Kurve ist jedoch leider für tiefe Frequenzen unvollständig und lässt sich daher kaum mit der Theorie vergleichen. In den letzten Jahren sind von den Fabriken viele weitere Versuche zum Spulenproblem gemacht worden, deren Resultat die heute in Deutschland und in der Schweiz durchgeführte Sprungwellenprüfung an Transformatoren und Maschinen darstellt. Alle diese Versuche beschränken sich auf Spannungsmessungen mittelst Kugelfunkenstrecken über die Beanspruchung von Wicklungen zwischen den einzelnen Windungen und gegen Erde. Ueber solche Messungen siehe Courvoisier[1]). Die Frage, was eigentlich beim Eindringen solcher Sprungwellen in Wicklungen passiert, haben diese Versuche nicht aufgeklärt. Sie sollen lediglich den Vorgang bei plötzlichem Erdschluss im Netz durch einen gleichwertigen Prüffeldversuch nachahmen. Ob sie das tun, ist heute eine umstrittene Frage.

Einen sehr wertvollen experimentellen Beitrag hat das Spulenproblem erfahren durch die Arbeit von J. Fallou[m]). Darin wird die Spannungsverteilung über die Wicklungen eines Transformators bei stationären Schwingungen bis zu 200 000 Per. untersucht. Fallou findet, dass der Transformator wohl zu Eigenschwingungen befähigt ist, dass aber lediglich die tiefste Strom- und Spannungsresonanz sich in praktisch wichtigem Mass ausbildet. Die Oberwellen sind vorhanden, aber nur schwach ausgeprägt. Aus den Figuren geht hervor, dass etwa von der dritten Strom- oder Spannungsresonanz an die exponentiell über die Wicklung abfallende Spannungsverteilung überwiegt.

Gegenüber der Theorie, die Fallou eingangs erwähnt, welche die Spule als Leitung mit verteilter Induktivität und Kapazität auffasst, ist zu sagen, dass offenbar die Dämpfung der Schwingungen in Wicklungen eine praktisch wesentliche Rolle spielt. Sie bewirkt, dass von der theoretisch unendlichen Serie von Eigenschwingungen einer Spule nur die allerersten (tiefsten) Bedeutung haben; die höheren bilden sich infolge zu hoher Dämpfung in technischen Spulen nicht aus, oder nur in praktisch vernachlässigbarem Mass.

[16]) Siehe Rogowski, Flegler & Tamm, A. f. E. 1927, Heft 5.

Die im vorangehenden Aufsatz beschriebene Untersuchung von Stromwandlern bot Gelegenheit, das Verhalten derselben bei Hochfrequenz experimentell festzustellen. Da es sich hier um 2 gekoppelte Spulen mit relativ wenigen Windungen handelt im Vergleich zu Wicklungen von Leistungstransformatoren, ist es von Interesse, die Versuchsresultate mit der von Rogowski aufgestellten Theorie einer einzelnen Spule mit wenig Windungen zu vergleichen. Als Ergänzung zu der im Hauptaufsatz besprochenen Schwingfähigkeit der Stromwandler bei Hochfrequenz sollen daher die Messresultate der durchgeführten Versuche wiedergegeben werden.

b) Daten der Versuchsstromwandler.

Es wurden 6 Stromwandler untersucht (bei Frequenzen von ca. 4000 bis über 10^6. Die Daten der Wandler sind folgende:

No. 1. 1 Oel-Stromwandler 10/5 A, 60 VA Leistung, 24 kV, $16^2/_3$ Per., grössere Type, zum Versuch überlassen von der Eichstätte des S. E. V. Der Stromwandler ist versehen mit einem Parallelwiderstand aus Silit in Ringform, 200 Ohm Nennwert, mit vorgeschalteter Funkenstrecke mit ca. 0,5 mm Luftdistanz.

No. 2. 1 Oel-Stromwandler 10/5 A, 60 VA Leistung, 24 kV, $16^2/_3$ Per., kleinere Type, zum Versuch überlassen von der Eichstätte des S. E. V. Der Wandler ist versehen mit einem Parallelwiderstand aus Silit in Ringform, 235 Ohm Nennwert.

No. 3. 1 Oel-Stromwandler 15/5 A, 16 bis 20 VA Leistung, 24 kV, 50 Per., in freundlicher Weise zur Verfügung gestellt von den B.K.W. Der Wandler ist versehen mit einem Parallelwiderstand aus Silit in Stabform, 500 Ohm Nennwert, sowie einer Parallelfunkenstrecke mit ca. 3 mm Luftdistanz.

No. 4. 1 vaselingefüllter Stromwandler 25/5, resp. 50/5, resp. 100/5 A, 12 VA Leistung, 24 kV, 50 Per., im Besitze der Eichstätte des S. E. V.

No. 5. 1 Oel-Stromwandler 100/5 A resp. 200/5 A, 80 VA Leistung, 12 kV, 50 Per., zur Verfügung gestellt von den B.K.W. Der Wandler ist versehen mit einem Parallelwiderstand aus Silit in Stabform, 50 Ohm Nennwert, sowie einer Parallelfunkenstrecke mit ca. 3 mm Luftdistanz.

No. 6. 1 Mehrfach-Stabstromwandler 150/5 resp. 300/5 A, 100 VA Leistung, 50 Per., in freundlicher Weise zur Verfügung gestellt vom E. W. der Stadt Zürich. Der Wandler ist versehen mit einem Parallelwiderstand aus Silit in Stabform, 220 Ohm Nennwert.

Die Wicklungen der Primärspulen dieser Stromwandler haben folgende Daten:

No. 1. Gewöhnliche Lagenwicklung mit ca. 15 Lagen à ca. 36 Windungen, total 540 Windungen, Drahtdurchmesser blank 2,4 mm, isoliert 2,8 mm, Spule 110 mm lang, Spulendurchmesser aussen 270 mm.

No. 2. Gewöhnliche Lagenwicklung mit ca. 13 Lagen à ca. 32 Windungen, total 420 Windungen, Drahtdurchmesser blank 2,4 mm, isoliert 2,8 mm, Spule 100 mm lang, Spulendurchmesser aussen 235 mm.

No. 3. Gewöhnliche Lagenwicklung mit 3 Lagen à ca. 23 Windungen, total 68 Windungen, Drahtdurchmesser blank 2,7 mm, isoliert 3,0 mm, Spule 75 mm lang, ca. 110/130 mm Durchmesser.

No. 4. Lagenwicklung mit 4 parallelgewickelten Drähten in 4×20 Windungen, 17 Windungen pro Lage, Drahtdurchmesser blank 3,5 mm, isoliert 3,9 mm, Spule 75 mm lang, ca. 110/150 mm Durchmesser.

No. 5. Lagenwicklung mit 2 parallelgewickelten Drähten, 2×10 Windungen in 3 Lagen, Drahtdurchmesser blank 7,6 mm, isoliert 8,6 mm, Spule 75 mm lang, ca. 110/160 mm.

No. 6. 2×5 Windungen aus rechteckigem Profildraht, Spule rechteckig, ca. 140×35 cm Seitenlänge. Dieser Wandler war leider nur kurze Zeit verfügbar. Sein Verhalten war bei der allein untersuchten Schaltung 150/5 A analog demjenigen des Wandlers No. 3. Seine Grenzfrequenz lag bei 170000 Per.

c) Gemessene Grössen und Versuchsanordnungen dazu.

Zwei Grössen beanspruchen das Hauptinteresse.

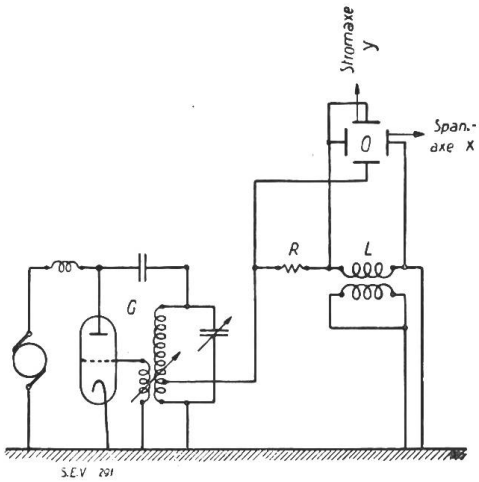

Fig. 26.
Anordnung zur Impedanzmessung.

1. Für die *Untersuchung des Stromwandlers allein* interessiert besonders die Impedanz Z des Wandlers, d. h. das Verhältnis der aufgedrückten Spannung zwischen den Klemmen der Primärwicklung L_1 L_2 und dem aufgenommenen Klemmenstrom. Diese Werte wurden gemessen bei kurzgeschlossener und geerdeter Sekundärwicklung des Wandlers. Ebenso war der Kübel und eine der beiden Primärklemmen stets geerdet nach dem Schema der Fig. 26. Zur Erzeugung der hochfrequenten Schwingungen diente ein Röhren-Generator, dessen Frequenz sich einstellen liess auf Werte von ca. 4000 bis über 10^6. Mit einer Anzapfung der Schwingdrosselspule wurde die eine Klemme der Primärwicklung des zu untersuchenden Stromwandlers direkt oder über einen sehr induktionsarmen Widerstand R verbunden. Dieser ermöglichte die Messung des Klemmenstromes der Grösse und Phase nach, wie unten beschrieben wird, bis zu Frequenzen von ca. 10^5 mit guter Genauigkeit.

In der Figur bedeuten:

R = ein induktionsfreier Widerstand
L = die Primärwicklung des Stromwandlers
G = ein als Hochfrequenzgenerator benützter Röhrensender
O = der Kathodenstrahl-Oscillograph.

Für jene Fälle, wo es nur auf den Absolutwert ankam und ferner für die Frequenzen über 300 000, wurde der Strom mit einem Thermokreuz gemessen. Zur Messung der Frequenz des Hochfrequenzgenerators G diente ein Wellenmesser von S. & H., bei Frequenzen über 300 000 ein Seibt-Wellenmesser. Die Frequenzmessung geschah derart, dass ein abstimmbarer und geeichter Schwingungskreis dem Röhrensender genähert wurde. Stimmen die Frequenzen des Wellenmessers und des Senders überein, so bewirkt die Annäherung eine erhöhte Dämpfung der Senderschwingung, die sich am Strommesser des Schwingkreises deutlich bemerkbar macht. Die Frequenzmessung ist auf diese Weise sehr genau.

Der Oscillograph misst nach Fig. 26 durch die Strahlablenkung in der Richtung x die Spannung über die Primärwicklung L_1 L_2 des Wandlers, durch die Ablenkung in der Richtung y den Spannungsabfall am bekannten Widerstand R und damit den der Primärwicklung zufliessenden Strom. Die Schaltung ist diejenige eines Braunschen Rohres, da es sich bei der Untersuchung um stationäre Schwingungen handelt.

Ist der Strom $i = 0$ und führt die Spannung v eine sinus-Schwingung in Funktion der Zeit aus, so zeichnet der Kathodenstrahl auf dem Leuchtschirm oder auf der Photoplatte eine begrenzte Strecke auf längs der x-Achse. Die Länge dieser Strecke gibt ein Mass für die Amplitude der Spannung v.

Ist die Spannung $v = 0$ und führt der Strom i eine sinus-Schwingung in Funktion der Zeit aus, so zeichnet der Kathodenstrahl auf dem Leuchtschirm oder auf der Photoplatte eine begrenzte Strecke auf längs der y-Achse. Die Länge dieser Strecke gibt ein Mass für die Amplitude des Stromes i.

Führen nun Spannung v und Strom i gleichzeitig sinus-Schwingungen aus in Funktion der Zeit, so beschreibt der Kathodenstrahl je nach der Phasenverschiebung φ zwischen Spannung und Strom gerade Strecken ($\varphi = 0$), oder Kreise ($\varphi = 90^0$,

Stromamplitude = Spannungsamplitude) oder allgemein Ellipsen. An diese bekannte Tatsache erinnert man sich am einfachsten dadurch, dass man bedenkt, dass die Gleichungen der beiden Schwingungen

$$v = V_m \sin \omega t$$
$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi)$$

zusammen in einem Achsenkreuz mit v- und i-Achsen die Gleichung einer Ellipse darstellen, die sich durch Elimination der Zeit t ergibt.

Die maximale Auslenkung in Richtung der x-Achse gibt stets die Aplitude V_m an; die maximale Auslenkung in Richtung der y-Achse die Aplitude des Stromes I_m. Die Phase φ zwischen Spannung und Strom ergibt sich ebenso einfach aus den Oscillogrammen auf folgende Art, siehe Fig. 27.

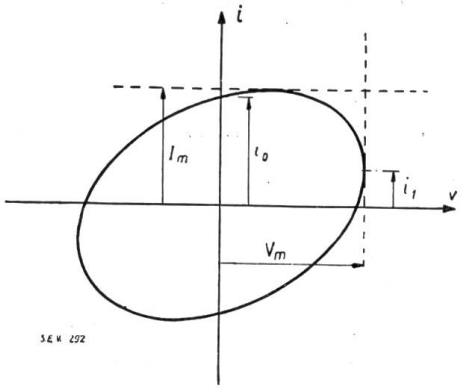

Fig. 27.
Erklärung des Impedanz-Oscillogramms.

Für $\underline{v = 0}$ ist $t = 0$ oder π, und $i_0 = \pm I_m \sin\varphi$, oder $\sin\varphi = \frac{i_0}{I_m}$

$\sin\varphi$ stellt sich also dar als Verhältnis des Achsen-Abschnittes auf der i-Achse zur Amplitude in Richtung der i-Achse. Dasselbe gilt für die v-Achse. Oder es könnte auch $\cos\varphi$ sofort aus der Ellipse gelesen werden wie folgt:

Für $\underline{v = V_m}$ ist $t = \frac{\pi}{2}$, und $i_1 = I_m \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = + I_m \cos\varphi$

oder $$\cos\varphi = \frac{i_1}{I_m};$$

$\cos\varphi$ stellt sich dar als Verhältnis des i-Wertes bei maximaler Spannung zur Amplitude I_m oder auch als das Verhältnis des v-Wertes bei max. Strom zur Amplitude V_m. Ob φ positiv oder negativ ist, d. h. ob der Strom der Spannung nacheilt oder vorauseilt, ergibt sich aus den Oscillogrammen nicht ohne weiteres, weil dazu der Umlaufssinn bekannt sein müsste. Doch kann dies bei den Versuchen auf andere Art leicht entschieden werden. Fig. 28 gibt ein solches Oscillogramm des Zusammenhanges zwischen Spannung und Strom. Es sind darin nacheinander die Impedanzen bei drei verschiedenen Frequenzen photographiert, nämlich bei 280 000, 250 000 und 230 000 Perioden. Das Oscillogramm wurde am Stromwandler Nr. 3 im Anlieferungszustand aufgenommen. Ausser den drei Ellipsen, wovon die eine bis auf schwache Oberwellen in eine schiefe Gerade ($\varphi = 0$) ausartet, ist auch das Achsenkreuz photographiert worden durch Aufnahme einer bekannten Eichspannung und eines Eichstromes aus dem städtischen Netz. Damit lassen sich aus den Oscillogrammen alle Werte, nämlich Grösse und Impedanz ablesen. Natürlich wurden bei den Versuchen nicht sämtliche gemessenen Werte photographisch festgehalten, sondern zum grossen Teil wurde die Ablesung des Kathodenstrahles auf dem Leuchtschirm von Auge verglichen mit der Ablenkung durch eine am Voltmeter messbare Spannung der Frequenz 50, die so lang variiert wurde, bis Gleichheit der Ausschläge eintrat. Die Kurven der so gemessenen Impedanzen Z sind in den Fig. 30–36 eingetragen.

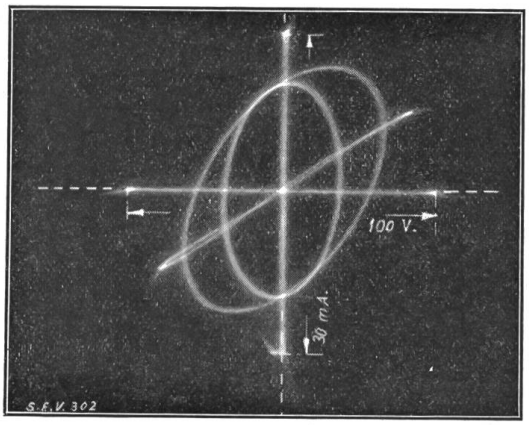

Fig. 28.
Beispiel eines an Stromwandler No. 3 aufgenommenen Impedanz-Oscillogramms, samt zugehörigen Eichwerten für Spannungs- und Stromachse.

Kurve 1: Bei der Grenzfrequenz $f_0 = 280\,000 \sim$
„ 2: „ „ Frequenz $f = 250\,000 \sim$
„ 3: „ „ „ $f = 230\,000 \sim$

2. Für die Untersuchung der *Schwingfähigkeit der Stromwandler in elektr. Anlagen* wurde das Verhältnis der auftretenden Resonanzspannung zur anregenden Spannung festgestellt in einem Schwingungskreis, der sich aus dem Stromwandler und einer in Serie geschalteten Ersatzkapazität zusammensetzt.

Fig. 29 gibt die Schaltung wieder, die im übrigen dem Anlagen-Schema der Fig. 2 entspricht. *L* bedeutet den zu untersuchenden Stromwandler, *G* den Hochfre-

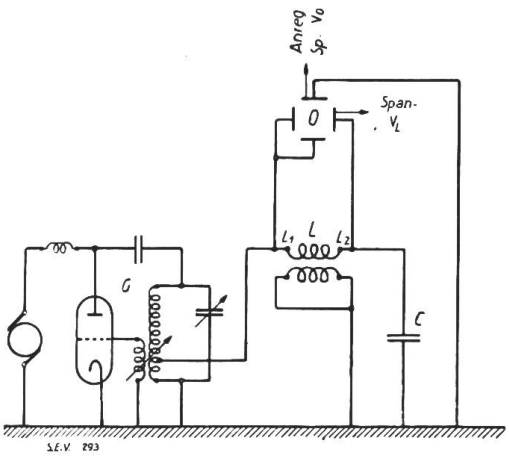

Fig. 29.
Anordnung zur Resonanzspannungsmessung.

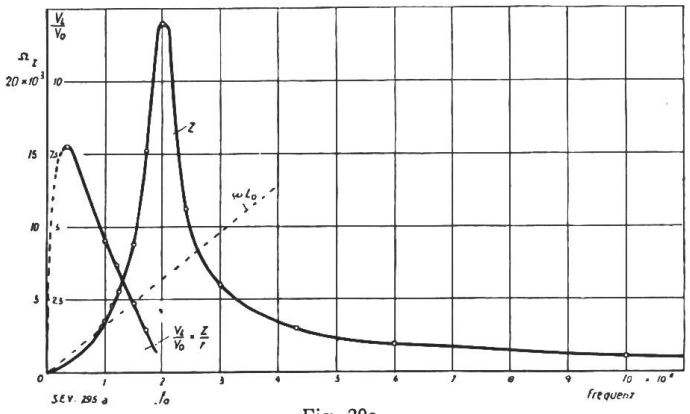

Fig. 30a.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 1, $^{10}/_5$ A, im Frequenzbereich bis 10^5 Perioden. ωL_0 stellt die auf Grund der bei Betriebsfrequenz ($16^2/_3$) gemessenen Streuinduktivität L_0 gerechnete Impedanz dar.

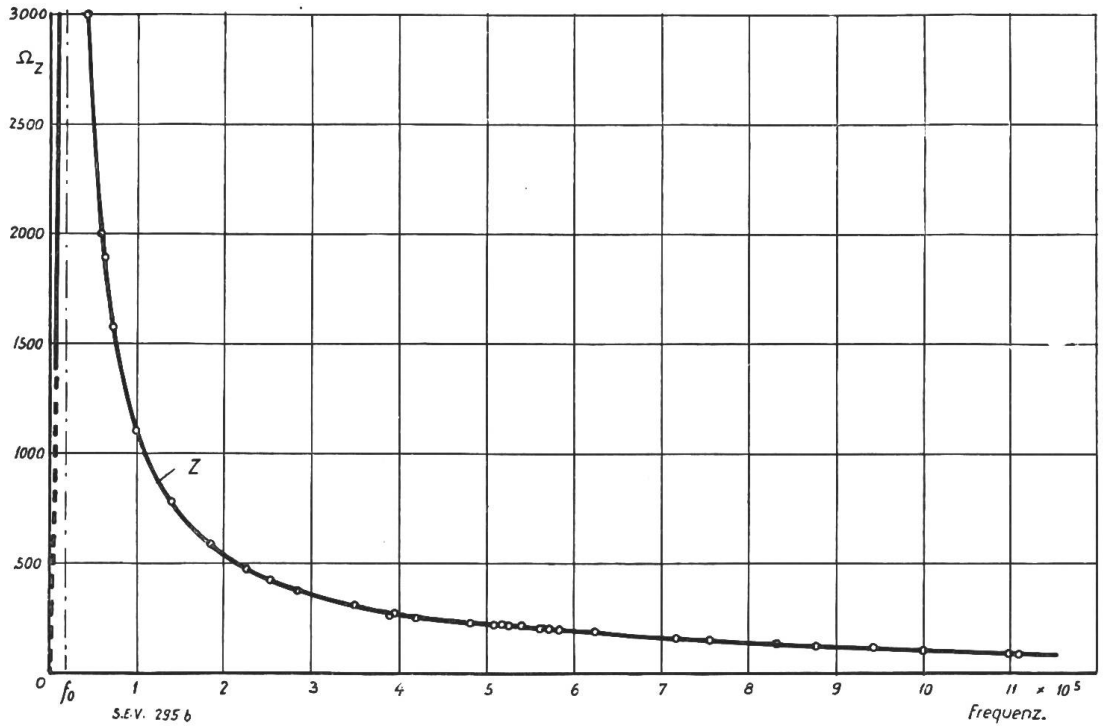

Fig. 30b.
Impedanzkurve *Z* desselben Stromwandlers wie Fig. 30a im Frequenzbereich bis ca. 10^6 Perioden.

quenz-Generator, *O* den Kathodenstrahl-Oscillographen. *C* stellt die Erdkapazität von Leitungen, Sammelschienen und Transformatoren der Fig. 2 dar. Die Werte der Ersatzkapazität *C* betrugen bis ca. 160000 cm, was ungefähr der Kapazität von 1 km Kabel oder 20 km Freileitung entspricht. Zur Messung wurde jeweils für bestimmte Werte der Kapazität *C* der Generator *G* auf die Resonanz-Frequenz von *L* und *C* abgestimmt, und zwar so, dass zwischen der anregenden Spannung und

derjenigen über die Wicklung 90° Phasenverschiebung bestand. Da die Verluste in den Kondensatoren gegenüber jenen im Stromwandler zu vernachlässigen sind, kann das so gemessene Spannungsverhältnis $\frac{V_L}{V_0}$ auch gelten als Verhältnis von Impedanz zu rein ohmschem Widerstand $\frac{Z}{r}$ des Wandlers allein bei der betreffenden Frequenz. Dieses Verhältnis entspricht dem von J. Fallou eingeführten „Facteur de surtension M“[m]). Es gibt zahlenmässig die Fähigkeit des Stromwandlers zu Resonanzschwingungen bei der betreffenden Frequenz an.

Die Resultate der Messungen dieser Hauptwerte sind in den folgenden Kurven dargestellt (Fig. 30 – 36).

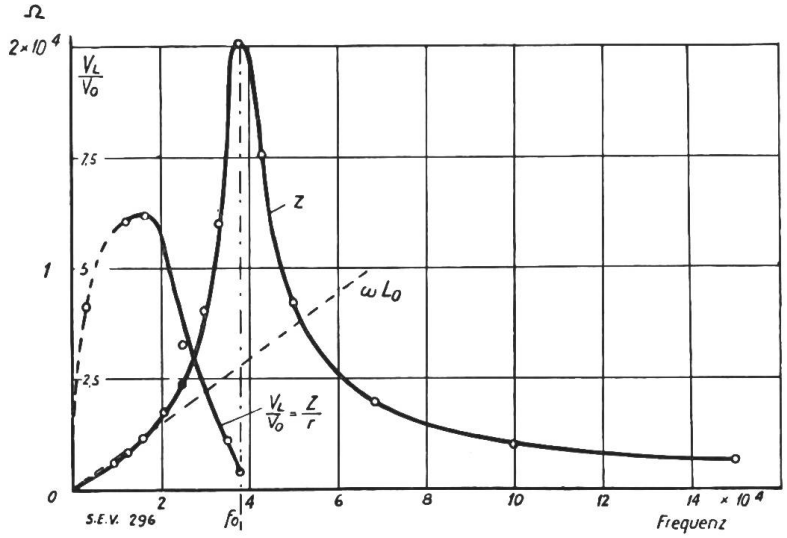

Fig. 31.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 2, $^{10}/_5$ A.
ωL_0 stellt die auf Grund der bei Betriebsfrequenz ($16^2/_3$) gemessenen Streuinduktivität L_0 gerechneten Impedanzwerte dar.

d) *Diskussion der Messungen.*

Bei Frequenz Null besteht die Impedanz lediglich aus dem ohmschen Widerstand. Bei Wechselstrom nimmt mit steigender Frequenz die Blindkomponente ωL bald überwiegende Werte gegenüber dem ohmschen Widerstand an. Für alle Wandler ist die Gerade ωL_0 eingezeichnet, wo L_0 die bei den Frequenzen $16^2/_3$ resp. 50 gemessenen Werte der Induktivität jedes Wandlers bedeutet. ωL ist bei tiefen und mittleren Frequenzen zunächst etwas kleiner als der aus L_0 gerechnete Wert ωL_0.

Der Unterschied ist für die Wandler mit kleinem Primärstrom und kleiner Leistung klein; für die Wandler mit grosser Lagenzahl der Primärwicklung (grosser Leistung) und aus dicken Drähten oder vielen parallelgewickelten Drähten (grossem Primärstrom) ist jedoch ωL bis ca. 30 % kleiner als ωL_0. Die Erscheinung erklärt sich aus der

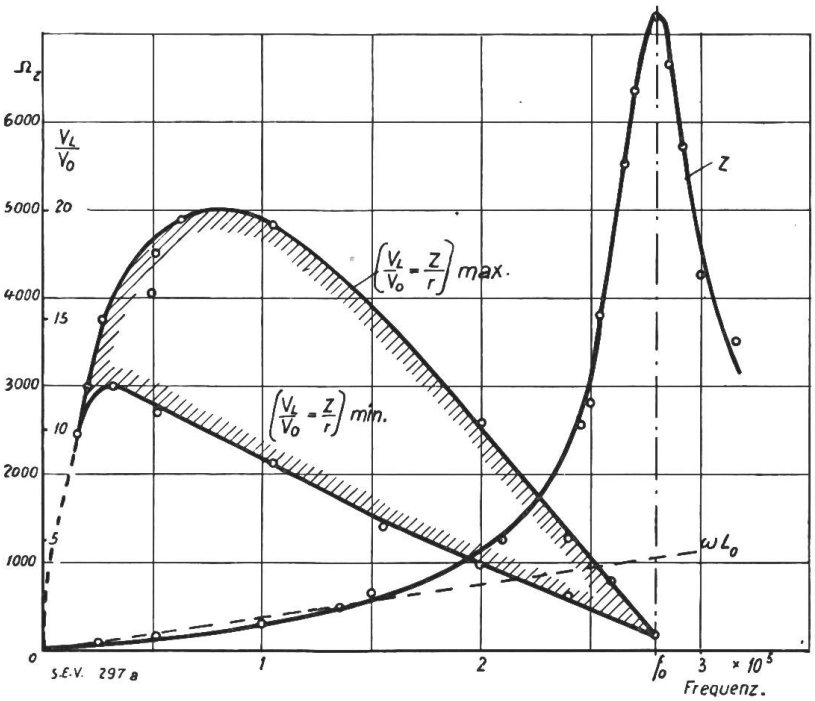

Fig. 32a.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 3, $^{15}/_5$ A, im Frequenzbereich bis ca. 3×10^5.
Das schraffierte Gebiet gibt die Lage aller bei verschiedenen Temperaturen, sowie vor und nach Auskochen des Wandlers gemessenen Werte $\frac{V_L}{V_0}$.
ωL_0 stellt die auf Grund der bei Betriebsfrequenz (50) gemessenen Streuinduktivität L_0 gerechneten Impedanzwerte dar.

Stromverdrängung in den Drähten einerseits und aus einer gründlicheren Feldverdrängung des Streufeldes aus dem Eisen bei Hochfrequenz; sie ist übrigens für Spulen bereits bekannt[17]).

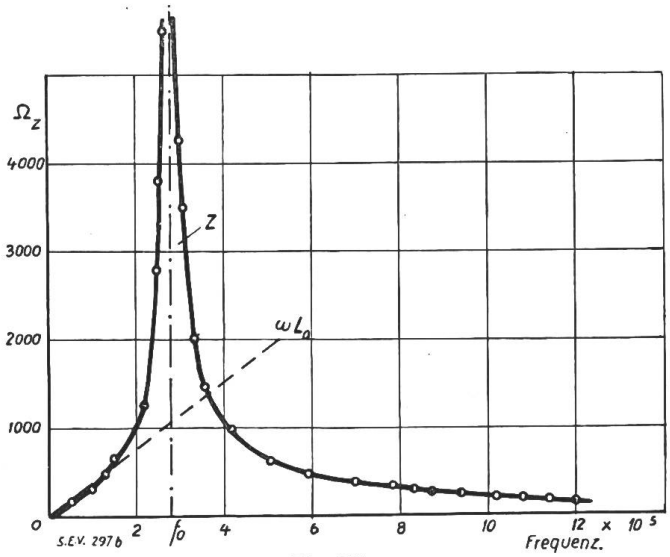

Fig. 32b.
Impedanzkurve Z für denselben Stromwandler wie Fig. 32a, bei Frequenzen bis ca. 10^6 gemessen.

Mit steigender Frequenz beginnt dann die Impedanz Z allmählig rascher zu wachsen als die Frequenz selber; sie erreicht die Werte ωL_0 und übersteigt sie dann. Schliesslich erreicht Z ein Maximum und sinkt dann derart, dass sich die Z-Kurve ungefähr einer Hyperbel $\frac{1}{\omega C}$ nähert. Soweit bis heute gemessen werden konnte, weichen die Z-Kurven nicht mehr wesentlich von dieser Hyperbel ab. Genauer betrachtet, sinkt die Impedanz mit höherer Frequenz etwas rascher als $\frac{1}{\omega C}$, so dass C mit höherer Frequenz etwas zunimmt.

Würde in den Kurven auch noch die Phasenverschiebung φ zwischen Spannung und Strom eingezeichnet, so ergibt sich, dass beim Maximalwert von Z stets φ durch Null geht, und zwar von induktiven Werten bei tieferer Frequenz zu kapazitiven Werten bei höherer Frequenz. Schneidet man die beiden Kurven, nämlich die Verlängerung der Kurve ωL mit der zweiten Grenzlinie $\frac{1}{\omega C}$, so fällt der Schnittpunkt ins Gebiet jener Frequenz, bei der Z das Maximum aufweist. *Aus den Kurven ergibt sich in sehr anschaulicher Weise, wie die Stromwandler bei tiefen Frequenzen als Drosseln wirken, um bei hohen Frequenzen sich als Kapazität zu erweisen. Beide Frequenzgebiete werden gegeneinander abgegrenzt durch die Grenzfrequenz f_0.*

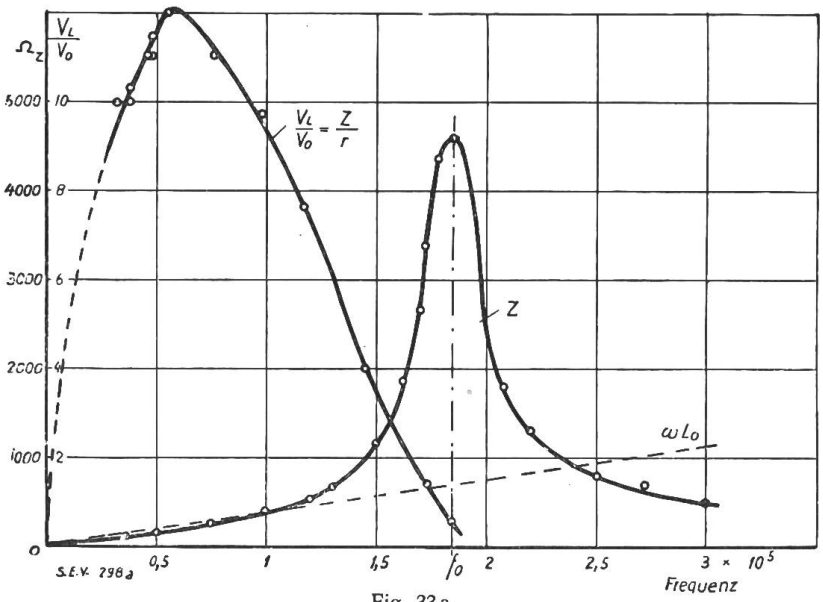

Fig. 33a.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 4, Schaltung $^{25}/_5$ A, im Frequenzbereich bis 3×10^5 Perioden. Bedeutung von ωL_0 siehe Fig. 32a.

Wir hätten infolgedessen mit Rogowski f_0 als Grundfrequenz 1. Art des Wandlers zu bezeichnen. Bei dieser Frequenz befindet er sich in Stromresonanz. Das Verhalten kann mit guter Annäherung wiedergegeben werden durch ein einziges Glied des Wagnerschen Kettenleiters oder durch das Schema der Rogowskischen Spule bei der Grundfrequenz 1. Art, nämlich durch einen einfachen Parallelschwingungskreis, Fig. 37. *Dieses Schema gilt sehr angenähert für den ganzen untersuchten*

[17]) Petersen, Ueberspannungen und Ueberspannungsschutz, ETZ 1913.

Frequenzbereich. Statt des komplizierten Verlaufs der Z-Kurve in Fig. 25 erhält man im Fall von Stromwandlern lediglich das 1. Maximum. Die höheren Eigenfrequenzen, deren Existenz auch für mehrlagige Spulen von Ridder durch Abtasten des elektromagnetischen Feldes an Versuchsspulen nachgewiesen ist und deren nächste bei 3- bis 4-facher Grundfrequenz zu erwarten wäre, bilden sich bei den untersuchten Stromwandlern entweder nicht aus oder dann machen sie sich in Klemmenspannung und Klemmenstrom, d. h. in der Impedanz des Wandlers nicht bemerkbar. Ob event. bei noch höheren Frequenzen sich Abweichungen vom hyperbelartigen Verlauf der Impedanz zeigen, bleibt abzuwarten. Dies scheint jedoch unwahrscheinlich zu sein.

Diese Erscheinung der Stromresonanz in der Primärwicklung tritt je nach den Wicklungsdaten bei sehr verschiedenen Frequenzen auf. Während sie bei den Wandlern für 10, 15, 25 und 50 A bei weniger als 10^6 Per. liegt, ist sie für die Wandler mit 100 A Primärstrom bereits über 10^6 Per. Prinzipiell scheint das Verhalten jedoch bei allen Wandlern (Spulen) dasselbe zu sein, lediglich die Höhe der Grenzfrequenz (Stromresonanzfrequenz) variiert je nach Primärstrom, Betriebsfrequenz und Leistung des Wandlers.

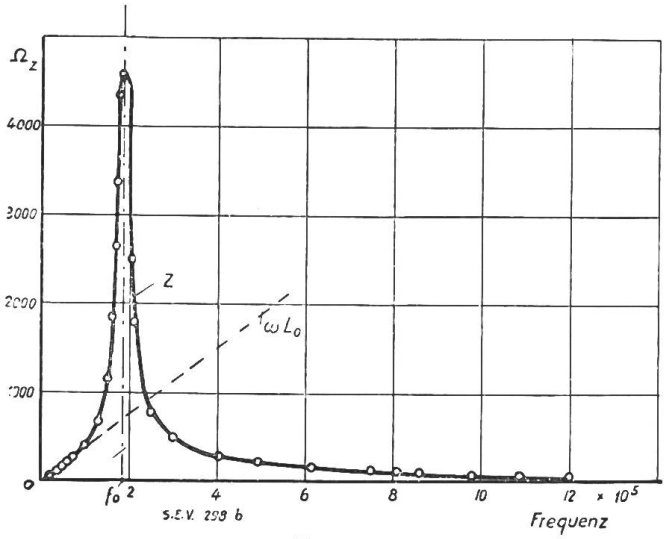

Fig. 33b.
Impedanzkurve Z für den Stromwandler der Fig. 33a bei Frequenzen bis ca. 10^6 Perioden gemessen.
Bedeutung von ωL_0 siehe Fig. 32a.

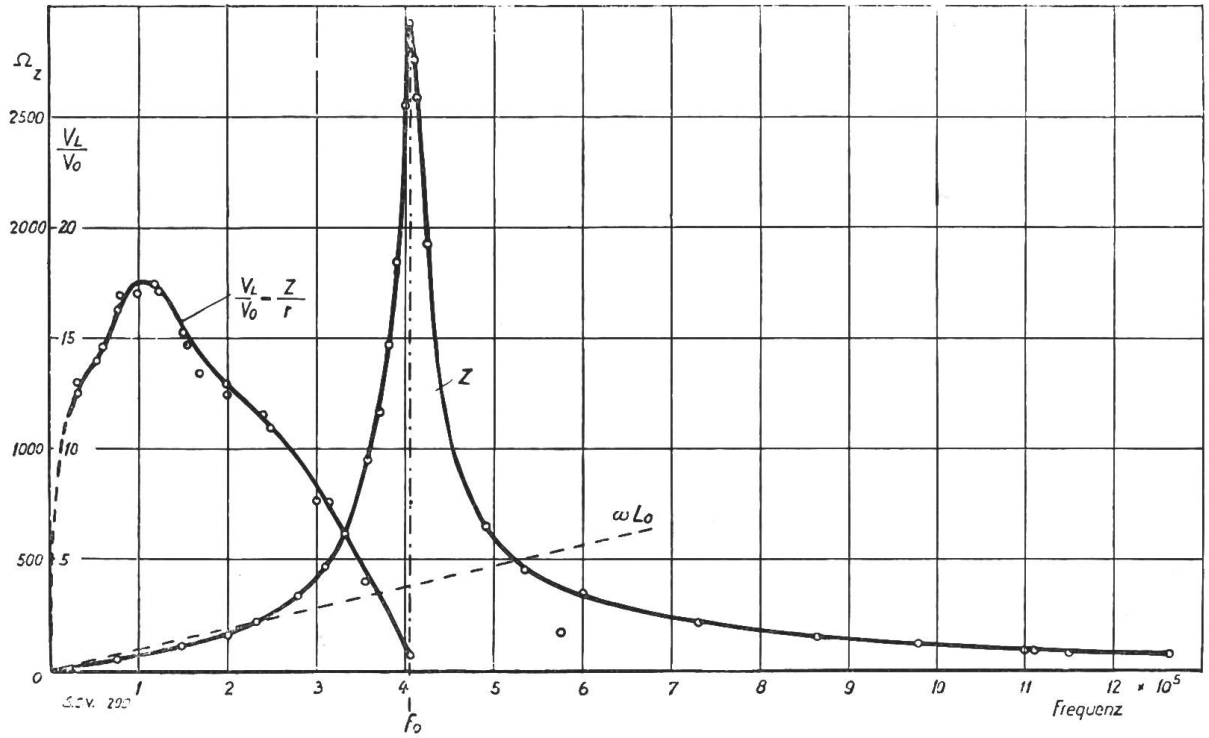

Fig. 34.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 4, Schaltung $^{50}/_5$ A.
Bedeutung von ωL_0 siehe Fig. 32a.

Die Kurven des Verhältnisses der erregten Resonanzspannung über die Wicklung zur anregenden Spannung $\frac{V_L}{V_0}$ zeigen, dass der Stromwandler recht gut zu Schwingungen befähigt ist. Die auftretende Schwingspannung beträgt bis zum 20-fachen der anregenden Spannung. Das Verhältnis hängt im übrigen stark von der Frequenz ab, wie die Kurven zeigen. Diese Tatsache ist dem komplizierten Verlauf des ohmschen Widerstandes bei Wechselstrom höherer Frequenz in folge des Skin-Effektes zuzuschreiben. Bei hohen Frequenzen müssen auch die elektrischen Verluste der Isolation der Drähte gegeneinander in Betracht kommen. Diese Kurven, sowie die Maxima der Z-Kurven sind daher viel mehr von den Versuchsumständen abhängig als die Impedanzkurven. Während letztere bei wochenlang auseinanderliegenden Messungen bis auf wenige Prozent eindeutige Werte ergeben, konnten durch Veränderung der Oeltemperatur bis 60° C und durch Auskochen des Wandlers Werte gemessen werden, die in einem Bereich liegen, der in Fig. 32 schraffiert eingezeichnet wurde. Die Kurven zeigen, dass es für jede Stromwandlerwicklung ein Frequenzgebiet gibt, in welchem die Primärwicklung am besten zu Resonanzschwingungen befähigt ist, nämlich in der Gegend des Maximums der Kurven $\frac{V_L}{V_0}$. In diesem Gebiet ist der ohmsche Wechselstromwiderstand im Vergleich zum Blindwiderstand am kleinsten, wie sich daraus ergibt, dass sich bekanntlich in einem Schwingungskreis die Resonanzspannung V_L zur anregenden Spannung V_0 verhält wie die Impedanz Z zum rein ohmschen Widerstand r.

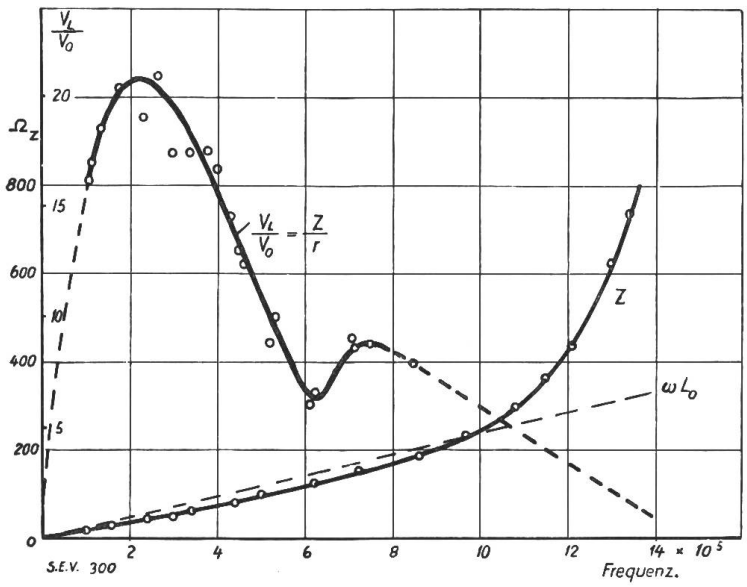

Fig. 35.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 4, Schaltung $^{100}/_5$ A.
Bedeutung von ωL_0 siehe Fig. 32a.

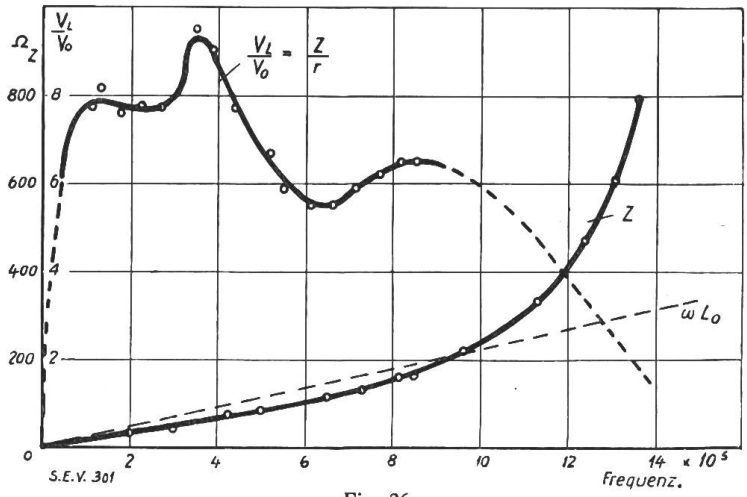

Fig. 36.
Impedanzkurve Z und Resonanzspannungskurve $\frac{V_L}{V_0}$ für Stromwandler No. 5, $^{100}/_5$ A.
Bedeutung von ωL_0 siehe Fig. 32a.

Jene Wandler, deren Impedanzmaximum im Messbereich liegt (Fig. 30 bis 34), zeigen deutlich die abnehmende Schwingfähigkeit bei der Annäherung an die zugehörige Grenzfrequenz. Bei Frequenzwerten über der Grenzfrequenz war es nicht mehr möglich, den Wandler mit einer in Serie liegenden Kapazität zum Schwingen zu bringen, da er sich dann selber wie eine Kapazität verhält.

Hingegen müsste es gelingen, den Wandler bei diesen hohen Frequenzen mit einer Seriedrosselspule zusammen schwingen zu lassen. Dieser Fall hat jedoch kaum praktisches Interesse.

Ebenso hat der Messpunkt bei der Grenzfrequenz des Wandlers selber wenig praktisches Interesse, hingegen ist diese Frequenzgegend sehr wertvoll für die Untersuchung des Verhaltens der Spule. Es ist nicht möglich, hierauf einzugehen.

Zusammenfassend bemerken wir, dass die Rogowskische Theorie der Spule mit wenig Windungen das Verhalten von Stromwandlern bei Speisung mit Hochfrequenz gut erklärt bis zu Frequenzen, die etwas über der 1. Eigenfrequenz (Stromresonanz) des Wandlers liegen. Die bei höheren Frequenzen nach der genannten Theorie zu erwartenden und von Ridder an Versuchsspulen nachgewiesenen höheren Eigenfrequenzen hingegen konnten in der Stromwandler-Impedanz bis zu Frequenzen von über 10^6 Perioden nicht nachgewiesen werden. Die Ursache dieser Erscheinung dürfte erstens in der Anwesenheit einer Sekundärwicklung, zweitens in der starken Zunahme der Dämpfung bei höherer Frequenz liegen. Beide Einflüsse bewirken, dass von den vielen theoretisch möglichen Eigenschwingungen der Stromwandlerwicklung praktisch nur die tiefste Stromresonanz zum Vorschein kommt und daher das bei Hochfrequenz zu beobachtende Verhalten des Wandlers im ganzen Frequenzbereich mit guter Näherung durch dasjenige einer Parallelschaltung von widerstandsbehafteter Induktivität mit Kapazität dargestellt werden kann. Die Berechnung der auftretenden Kapazitätswerte oder jene der Grenzfrequenzen f^0 aus den Wicklungsdaten der Stromwandler bleibt eine noch zu lösende Aufgabe. Dabei können die Beobachtungen behülflich sein, dass sich die beschriebenen Erscheinungen nicht wesentlich änderten, wenn: 1. in die sekundäre Kurzschlussverbindung Widerstände eingeschaltet wurden (bis 100 Ω), 2. die Primärklemmen vertauscht wurden, 3. der Wandler ohne Oelfüllung untersucht wurde.

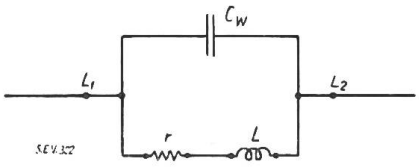

Fig. 37.
Durch die Versuche erwiesenes Ersatzschema für das Verhalten des Stromwandlers bei Hochfrequenz.

Literatur-Verzeichnis.

a) *W. Lenz:* Berechnung der Eigenschwingungen einlagiger Drahtspulen, Ann. d. Ph., Bd. 43, 1914.

b) *O. Szasz:* Mathematischer Beitrag zur Arbeit von W. Lenz, daselbst.

c) *P. Drude:* Zur Konstruktion von Tesla-Transformatoren, Schwingungsdauer und Selbstinduktion von Drahtspulen, Ann. d. Ph., Bd. 9, 1902.

d) *G. Seibt:* Elektrische Drahtwellen, ETZ 1902 und 1903.

e) *A. Gothe:* Kritische Frequenz und Eigenfrequenzen einlagiger Spulen, A. f. E., Bd. 9, 1920.

f) *C. Ridder:* Eigenfrequenzen von Spulen, A. f. E., Bd. 10, 1921.

g) *R. Rüdenberg:* Verlauf elektrischer Sprungwellen, E. u. M. 1915.

h) *K. W. Wagner:* Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität, E. u. M. 1915;
ferner:
Ueber eine Formel von Heaviside zur Berechnung von Einschaltvorgängen, A. f. E. Bd. 4, 1916;
ferner:
Wanderwellenschwingungen in Transformatorwicklungen, A. f. E., Bd. 6, 1918.

i) *O. Böhm:* Rechnerische und experimentelle Untersuchung der Einwirkung von Wanderwellenschwingungen auf Transformatorwicklungen, A. f. E., Bd. 5, 1917;
ferner:
Die stationären Schwingungen der wechselstromgespeisten Spule, A. f. E., Bd. 9, 1920.

k) *W. Rogowski:* Spulen und Wanderwellen, I: Einschaltspannungen der Spule aus zwei Windungen, A. f. E., Bd. 6, 1918;
ferner:
Spulen und Wanderwellen, II: Resonanzspannungen beim Einschalten einer Spule, aus 2 Windungen, A. f. E., Bd. 6, 1918;
ferner:
Die Spule bei Wechselstrom, A. f. E., Bd. 7, 1918/19;
ferner:
Spulen u. Wanderwellen, III: Erweiterung des theoretischen Rüstzeuges, 1918/19, Bd. 7;

ferner:
Wanderwellen und Spulen, IV, Einschaltvorgang der Spule aus 3 Windungen, A. f. E., Bd. 7, 1918/19;
ferner:
Ueberspannungen und Eigenfrequenzen einer Spule, A. f. E., Bd. 7, 1918/19;
ferner:
Spulen und Wanderwellen, V: Einschaltspannungen der flachen Spule, A. f. E., Bd. 7, 1918/19.
l) *G. Courvoisier:* Ueber Sprungwellen-Beanspruchung von Transformatoren, Bulletin SEV, 1922.
m) *J. Fallou:* Contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs, R. G. E. 21. nov. 1925 et Bull. Soc. Franç. des Electriciens, mars 1926;
ferner:
Nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs, R. G. E. 27. nov. 1926.

Elektrizitätswerksbetrieb. — Exploitation de centrales d'électricité.

Betrachtungen über eine für schweizerische Verhältnisse passende Energie-Tarifform und über die Verwendung der inkonstanten Energie.[1])

Von Ing. *O. Ganguillet,* Sekretär des V. S. E.

621.371

Der Autor bespricht zunächst die Grundsätze, nach denen der Preis der elektrischen Energie gewöhnlich abgestuft wird. Er zeigt ferner, dass wenige einfache Tarife, unter denen die Abonnenten je nach der von ihnen beanspruchten Leistung 2 oder 3 frei wählen könnten, genügen würden, ohne eine Preisabstufung nach dem Verwendungszwecke nötig zu machen. Der Autor schliesst mit einigen Betrachtungen über die Benutzung der inkonstanten Energie.

L'auteur expose les principes suivants lesquels on différencie généralement le prix de l'énergie électrique. Il démontre qu'il suffirait de très peu de tarifs simples, parmi lesquels les abonnés pourraient en choisir 2 ou 3, suivant la puissance exigée et que dans ces conditions on pourrait faire abstraction d'une différentiation de prix suivant le genre d'application de l'énergie. L'article se termine par quelques considérations sur l'utilisation de l'énergie inconstante.

Seit dem Bestehen der Elektrizitätswerke sind Energietarife nach mancherlei Gesichtspunkten aufgestellt worden, immer in der Absicht, sie für das Publikum anziehend zu gestalten und den Stromabsatz und damit den Gewinn der Werke zu fördern.

Damit der Konsument beim Elektrizitätswerk Energie bezieht, muss er zunächst davon überzeugt sein, dass er sie nicht auf andere Weise billiger beziehen könnte. Dementsprechend müssen die Tarife so aufgebaut sein, dass alle Konsumenten, gross und klein, in jeder praktisch auftretenden Situation vom Werke die Energie billiger erhalten, als wenn sie sich diese auf andere Art verschaffen würden. Damit anderseits das Werk einen sicheren Gewinn herauswirtschaftet, muss *jede* Energieabgabe mehr Gewinn als Ausgaben mit sich bringen.

Das Werk kennt seine Gesamtausgaben, es kennt manchmal auch die besonderen Ausgaben im Verteilnetz, die der Anschluss eines neuen Kunden verursacht; aber es weiss nicht mit Genauigkeit anzugeben, wie teuer ihm die Energiequote eines bestimmten Kunden zu stehen kommt. Dieselbe Energiemenge, zu denselben Bedingungen geliefert, kann für das eine Werk einen Gewinn, für das andere einen Verlust bedeuten. Es ist deshalb natürlich, dass ein Werk hie und da seinen

[1]) Da wir in Tarifsachen nicht über eine langjährige persönliche Erfahrung verfügen, hatten wir zuerst einige Bedenken, in dieser Sache einen Vorschlag zu veröffentlichen. Unsere Bedenken sind aber geschwunden, als wir anlässlich der letztes Jahr unternommenen Tarifenquête konstatieren konnten, dass unter den auf diesem Gebiete erfahrenen Ingenieuren trotz ihrer Erfahrung sehr divergierende Ansichten bestehen, und dass sehr verschiedene Tarifformen in Bezug auf Höhe der Einnahmen gleich gute Resultate ergeben können. Wir sind übrigens nicht der Auffassung, dass das hier vorgeschlagene Tarifsystem unter allen Umständen das beste sei. Ueberall hat das schon eingeführte Tarifsystem den grossen Vorteil, dass das Publikum schon daran gewöhnt ist und dass man seine Auswirkung auf die Einnahmen schon kennt.